


## BIOTECNOLOGIA AMBIENTAL APLICADA EM ARECÁCEAS VIA BIOFERTILIZANTE SUSTENTÁVEL, UMA ALTERNATIVA PARA AO SEQUESTRO DE CARBONO

 <https://doi.org/10.56238/arev7n4-041>

Data de submissão: 06/03/2025

Data de publicação: 06/04/2025

**Zilmar Timoteo Soares**

Doutor em Educação  
Professor Associado I  
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão-UEMASUL  
Coordenador de Gestão de Projeto de Educação  
Imperatriz - Maranhão  
Zilmar.soares@uemasul.edu.br

**Luís Gustavo Neres Ferreira Soares**

Acadêmico do Programa Cientista Aprendiz/ UEMASUL  
Escola Santa Teresinha  
3º ano do Ensino Médio/ PIC Junior  
Imperatriz – Maranhão  
luisgusair155@gmail.com

**Roney Lima Souza**

Mestre em Ensino de Física  
Universidade Federal do Norte do Tocantins – UFNT  
Imperatriz – Maranhão  
ronneyfisica@gmail.com

**Gustavo Botega Serra**

Graduando em Human Developmental and Regenerative Biology  
Harvard University – Cambridge, Massachusetts, USA  
gustavobserra2@gmail.com

**Jeam Nunes Moreira**

Graduando em Ciências Biológicas/4º período  
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão-UEMASUL  
Diretor de Inovação e Tecnologia do Programa Cientista Aprendiz/UEMASUL  
Imperatriz - Maranhão  
Jeam.moreira@uemasul.edu.br

**Jullyana Amorim Carvalho**

Graduando em Ciências Biológicas/ Período  
Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão-UEMASUL  
Secretaria do Programa Cientista aprendiz/UEMASUL  
Imperatriz – Maranhão  
Jullyanaamorimcarvalho743@gmail.com

## RESUMO

O efeito estufa causa diversos problemas ambientais, como o aumento das temperaturas globais, mudanças climáticas extremas, elevação do nível do mar, derretimento das geleiras, acidificação dos oceanos e perda de biodiversidade. Nesse contexto, a biotecnologia ambiental aplicada às arecáceas, com destaque para as palmeiras, surge como uma alternativa inovadora e sustentável para o sequestro de carbono. Este trabalho tem como objetivo avaliar as aplicações de biofertilizantes em arecáceas, utilizando a biotecnologia ambiental como uma estratégia promissora para otimizar o sequestro de carbono nessa família de plantas. Para atingir esse objetivo, foram adotadas as seguintes metodologias: revisão da literatura, extração e caracterização de genes específicos nas espécies de Arecaceae, análise das espécies com maior eficiência no sequestro de carbono, monitoramento do impacto da aplicação de biofertilizantes nas palmeiras, avaliação dos efeitos da biotecnologia nas interações planta-ambiente, monitoramento do sequestro de carbono em palmeiras geneticamente melhoradas, e acompanhamento do aprimoramento e potencialização fotossintética das palmeiras jovens por meio do EMGPALM. Os resultados demonstraram que a média de clorofila por espécie foi de  $2,09 \text{ mg/ml} \pm 0,41$ . A média de biomassa por tonelada por ano foi de  $5,02 \pm 0,32$ , enquanto a de carbono foi de  $2,26 \pm 0,29$ . A biomassa em peso fresco média por palmeira foi de  $4,23 \text{ kg/m}^2$ , e em peso seco foi de  $2,58 \text{ kg/m}^2$ . Após a aplicação do biofertilizante em seis espécies de palmeiras, o crescimento anual variou de 40 cm a 90 cm. O número de folhas foi de 9 a 12, com uma média de biomassa de  $7,51 \pm 0,37 \text{ t/ha}$  e um sequestro de carbono de  $4,54 \pm 0,4 \text{ t/ha}$ . Em comparação, o grupo controle, que não recebeu o biofertilizante, apresentou um crescimento anual entre 17 cm e 40 cm, com o número de folhas variando entre 7 e 9. A média de biomassa foi de  $1,52 \pm 0,02 \text{ t/ha}$ , e o sequestro de carbono foi de  $0,56 \pm 0,1 \text{ t/ha}$ . Portanto, a biotecnologia ambiental se destaca como uma alternativa promissora, inovadora e sustentável para maximizar o papel das Arecaceae no sequestro de carbono.

**Palavras-chave:** Fotossíntese Melhorada. Fixação de Carbono. Crédito de carbono.

## 1 INTRODUÇÃO

Os impactos do desmatamento e das queimadas incluem a perda de oportunidades para o uso sustentável da floresta, tanto para a produção de mercadorias tradicionais, como a madeira e produtos não madeireiros, quanto para a captura do valor dos serviços ambientais da floresta. O desmatamento também sacrifica a oportunidade de aproveitar os benefícios dos serviços ambientais da floresta. A natureza insustentável de praticamente todos os usos da terra em áreas desmatadas resulta em perdas significativas a longo prazo, ao impedir a manutenção da floresta (PHILIP, T. K.; ITODO, I. N, 2006).

As queimadas associadas ao desmatamento afetam a quantidade de gases emitidos não apenas da biomassa que queima, mas também da que não queima. Durante uma queimada, além da liberação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), também são liberados gases como metano ( $\text{CH}_4$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ). A biomassa que não queima na fase inicial, com chamas intensas, também será eventualmente oxidada (PHILIP, 2002).

A principal causa das mudanças climáticas drásticas e, às vezes, irreversíveis é o acúmulo de gases de efeito estufa na atmosfera. As árvores possuem uma capacidade excepcional de capturar e acumular gases, ajudando a evitar o superaquecimento do planeta (DAVID, 2018).

No entanto, o desmatamento em larga escala e descontrolado aumenta a concentração de gases de efeito estufa contribui significativamente para o aumento da temperatura e a intensificação das mudanças climáticas. Portanto, é essencial reduzir a perda de florestas e as emissões de gases de efeito estufa, além de focar na restauração da cobertura florestal. Essas ações podem ser realizadas utilizando tecnologias modernas para analisar a situação de diversos ângulos e tomar decisões informadas sobre como salvar florestas e reduzir as emissões de gases de efeito estufa globalmente (SILVA JUNIOR, 2020).

De acordo com Gregory P. Asher (2006), os gases de efeito estufa (GEE) aprisionam e emitem radiação infravermelha, aquecendo ainda mais a atmosfera e a superfície da Terra, o que resulta no efeito estufa. Os principais gases de efeito estufa são dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ) e óxido nitroso ( $\text{N}_2\text{O}$ ).

As plantas absorvem o excesso de dióxido de carbono em condições normais, e quando as florestas são queimadas ou cortadas, o  $\text{CO}_2$  acumulado é liberado. Assim, o desmatamento e o efeito estufa causam um aumento substancial na concentração desses gases. A principal fonte de outras emissões de gases é o desmatamento para a criação de terras agrícolas e o uso adicional de terras para agricultura e produção de alimentos (GREGORY P. ASHER, 2006).

Diante do problema apresentado, a pergunta norteadora é: Como a aplicação da biotecnologia ambiental pode otimizar a capacidade das areáceas no sequestro de carbono, oferecendo uma alternativa inovadora e sustentável para enfrentar os desafios das mudanças climáticas?

Nesse contexto, as crescentes preocupações com as mudanças climáticas têm estimulado a busca por soluções inovadoras que possam mitigar os impactos ambientais. A biotecnologia ambiental surge como uma ferramenta promissora, oferecendo novas possibilidades para enfrentar desafios globais. Esta pesquisa explora a aplicação da biotecnologia ambiental em areáceas, por meio de biofertilizantes, com foco na maximização do sequestro de carbono como estratégia fundamental para combater as emissões de gases de efeito estufa.

A biotecnologia ambiental, baseada em técnicas avançadas como edição genética e clonagem, oferece a capacidade de modificar organismos de maneira precisa. Essas ferramentas têm o potencial de aprimorar características cruciais em plantas, tornando-as mais eficientes na absorção de carbono, resistentes a condições adversas e contribuindo para a sustentabilidade ambiental (FERREIRA et al., 2005; SOARES-FILHO et al., 2004, 2005).

As areáceas, conhecidas como palmeiras, desempenham um papel crucial no sequestro de carbono. Com sua capacidade de absorver grandes quantidades de CO<sub>2</sub>, essas plantas contribuem significativamente para a redução dos níveis atmosféricos de carbono. A aplicação da biotecnologia ambiental visa potencializar essa capacidade natural, permitindo que as areáceas desempenhem um papel ainda mais proeminente na mitigação das mudanças climáticas (SU et al., 2020).

A aplicação da biotecnologia ambiental em areáceas pode ser direcionada para aumentar a eficiência na absorção de carbono, garantir resistência a pragas e adaptar-se a diferentes condições climáticas. Ao potencializar geneticamente as areáceas, podemos criar organismos mais robustos, capazes de enfrentar os desafios ambientais emergentes (SOARES-FILHO et al., 2004, 2005).

Os benefícios resultantes da aplicação da biotecnologia ambiental em areáceas por meio de biofertilizantes são diversos. Além de contribuir para a redução das emissões de carbono, essa abordagem pode gerar oportunidades econômicas sustentáveis, como a produção de biomassa e produtos derivados de palmeiras geneticamente aprimoradas.

A biotecnologia ambiental aplicada às areáceas, como as palmeiras e outras plantas dessa família, surge como uma alternativa inovadora e sustentável no contexto do sequestro de carbono. A aplicação estratégica de técnicas biotecnológicas a esse grupo de plantas apresenta um grande potencial para mitigar as mudanças climáticas e promover a sustentabilidade ambiental.

As areáceas desempenham um papel crucial na absorção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) da atmosfera, contribuindo assim para o equilíbrio climático global. No entanto, fatores como

desmatamento, degradação do solo e mudanças climáticas ameaçam a capacidade dessas plantas de cumprir efetivamente essa função vital Carvalho et al., (2010). É aqui que a biotecnologia ambiental, por meio de biofertilizantes, entra como uma ferramenta promissora.

Por meio da manipulação genética e outras técnicas avançadas, os cientistas podem aprimorar as características das areáceas para otimizar seu potencial de sequestro de carbono. Isso pode incluir a modificação de genes relacionados à taxa de fotossíntese, aumento da eficiência no uso da água e resistência a condições ambientais adversas. Ao potencializar essas características, a biotecnologia ambiental cria palmeiras mais robustas e adaptáveis, capazes de desempenhar um papel ainda mais vital na redução das concentrações de CO<sub>2</sub> na atmosfera (FERRERIRA et al., 1997).

Além disso, a pesquisa em biotecnologia ambiental por meio de biofertilizantes abre caminho para o desenvolvimento de variedades de areáceas que possam ser cultivadas de forma mais eficiente em diferentes ambientes, contribuindo para a restauração de ecossistemas degradados e promovendo a diversidade biológica. Essa abordagem não apenas fortalece a capacidade de sequestro de carbono dessas plantas, mas também impulsiona esforços de conservação e restauração ambiental.

Em síntese, a aplicação da biotecnologia ambiental em plantas da família Arecaceae, por meio do uso de biofertilizantes, representa uma estratégia inovadora e promissora para enfrentar os desafios do sequestro de carbono. Ao potencializar a fotossíntese dessas plantas, espera-se fortalecer sua capacidade natural de absorção de carbono, contribuindo significativamente para a mitigação das mudanças climáticas. Essa abordagem exemplifica a interseção entre avanços científicos e práticas sustentáveis, destacando o papel essencial da biotecnologia na construção de um futuro mais resiliente e ecologicamente equilibrado. Assim, a pesquisa tem como objetivo avaliar o uso de biofertilizantes em Arecaceae, utilizando a biotecnologia ambiental como uma alternativa eficaz para otimizar o sequestro de carbono nessa família de plantas.

## **2 MATERIAIS E MÉTODOS**

Trata-se de uma pesquisa campo e experimental que permitiu um controle rigoroso das condições experimentais, facilitando a validação de hipóteses e a obtenção de dados precisos. De acordo com Fonseca (2002, p. 11-12), a pesquisa experimental se caracteriza pela manipulação direta das variáveis relacionadas ao objeto de estudo e tem como objetivo testar as hipóteses formuladas pelo pesquisador.

## 2.1 A IMPORTÂNCIA DA PESQUISA DE CAMPO COMO SUBSÍDIO PARA A PESQUISA EXPERIMENTAL

De acordo com Fonseca (2002), a pesquisa de campo desempenha um papel crucial no desenvolvimento de investigações científicas, pois permite a coleta de dados diretamente do ambiente ou da realidade estudada. Esse tipo de pesquisa fornece informações empíricas e detalhadas que enriquecem as bases da pesquisa experimental, possibilitando a formulação de hipóteses mais precisas e contextualizadas.

Além disso, a interação com o objeto de estudo em seu contexto natural facilita a identificação de variáveis relevantes, promove a compreensão de fenômenos complexos e amplia as possibilidades de experimentação.

A pesquisa foi realizada em três locais distintos: em uma área de campo no Rancho Água Fria, onde foi criado um canteiro experimental; na Fazenda Mogno, onde as palmeiras foram analisadas em quatro quadrantes, ambas localizadas no município de Ananás, estado do Tocantins e nos laboratórios da Universidade Estadual da Região Tocantina do Maranhão – UEMASUL, para a análise dos materiais coletados.

A análise da eficiência no sequestro de carbono em espécies de Arecaceae (palmeiras) adotou uma abordagem multidisciplinar, que incluiu observações de campo, contagem das palmeiras em quatro quadrantes de 25 x 100 m, coleta de material e análises laboratoriais.

Foram coletados dados sobre as espécies presentes, registrando informações como o tamanho das palmeiras, DAP (diâmetro à altura do peito), biomassa acima do solo e densidade populacional. Os instrumentos utilizados incluíram fita métrica, GPS, câmera fotográfica, balança digital e forno elétrico. Para medir a biomassa das palmeiras e calcular o estoque de carbono por hectare/ano em diferentes espécies, foram aplicados os métodos descritos por Arevalo (2002) e Oliveira (2007), conforme a fórmula.

$$BA = 0,1184 \times DAP^2 \times 0,02 \text{ t/ha.}$$

Onde: **BA**= Biomassa, **0,1184** = constante, **DAP** = Diâmetro da altura do peito (cm), **0,02** = fator de conversão para quadrantes (parcela de 25m x 100m) e **t/ha** = tonelada por hectare ano.

Também foram realizados estudos preliminares sobre a eficiência fotossintética das palmeiras, conforme Golding e Smith (2007), com o objetivo de avaliar a capacidade das folhas em capturar dióxido de carbono e convertê-lo em biomassa. Foram considerados o comprimento das folhas, o peso fresco da biomassa e o peso seco da biomassa (ver Figura 6). Observou-se que essas características podem influenciar o sequestro de carbono em diferentes espécies de palmeiras.

Os dados coletados foram comparados entre diferentes espécies de Arecaceae para identificar aquelas com maior eficiência no sequestro de carbono, considerando os custos associados ao cultivo e à manutenção das diversas espécies de palmeiras em comparação com os benefícios gerados pelo sequestro de carbono

## 2.2 EXTRAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DE GENES ESPECÍFICOS EM ESPÉCIES DE ARECÁCEAS (PALMEIRAS) ASSOCIADOS AO SEQUESTRO DE CARBONO

A escolha das espécies de palmeiras da família Arecaceae para o estudo incluiu: açai (*Euterpe oleracea*), buriti (*Mauritia flexuosa*), buritirana (*Mauritiella aculeata*), babaçu (*Attalea speciosa* Mart.), bacaba (*Oenocarpus bacaba*), coco-da-praia (*Cocos nucifera* L.), coco-najá (*Maximiliana maripa*), macaúba (*Acrocomia aculeata*), piaçava (*Attalea funifera* Martius) e *P. trepadeira* (*Desmouçus sp.*). A seleção dessas espécies levou em consideração fatores como sua distribuição geográfica, capacidade de sequestro de carbono e disponibilidade de amostras.

As amostras foram coletadas das folhas de palmeiras jovens e adultas, em diferentes estágios de desenvolvimento. Para a extração de DNA, foram utilizados os métodos descritos por Thames e Kosmos (2023), no *Genetics & DNA Experiment*, e por Costa e Moura (2001), no *Manual de Extração de DNA: Embrapa*. Pequenos fragmentos de folhas de diferentes palmeiras foram analisados para investigar a expressão gênica e identificar genes envolvidos no sequestro de carbono.

Técnicas de microscopia e coloração com azul de metileno e lugol foram aplicadas para identificar as características morfológicas e estruturais dos cloroplastos, onde ocorre a fotossíntese, e para verificar o DNA cloroplástico. O objetivo era visualizar as informações genéticas essenciais para a síntese de proteínas envolvidas na fotossíntese, destacando a relação direta entre o material genético e a capacidade da planta de realizar fotossíntese e sequestro de carbono.

Foram utilizadas ferramentas bioinformáticas, como ChloroSeq e Geneious, que oferecem uma variedade de recursos para a análise de sequências genômicas, incluindo montagem, anotação e comparação.

Para realizar os testes estatísticos e avaliar a significância das diferenças genéticas observadas, foi aplicada a Análise de Variância (ANOVA) para verificar a variabilidade entre os grupos.

## 2.3 PRODUÇÃO DO BIOFERTILIZANTE

O processo de produção do biofertilizante envolveu o uso de cascas de banana, cascas de feijão, cascas de milho, cascas do fruto do buriti, cascas de frutas cítricas, cascas de amêndoa de castanha de caju, cinzas de madeiras velhas, cascas de ovo, pó de mesocarpo do coco da praia, esterco de vaca,



casca de abacate, casca de mamão e compostagem da decomposição de serapilheiras, que foram transformadas em pó.

As cascas foram adquiridas no Mercado Central de Imperatriz, Maranhão; no Rancho Água Fria, Tocantins; e na Fazenda Mogno. Para processar o material, foram utilizadas tesoura, faca, bacia de alumínio, forno elétrico, balança digital e moinho. O material foi cortado em pequenos pedaços, levado ao forno para secagem a 80°C e, em seguida, triturado no moinho até ser transformado em pó. Após esse processo, foi realizada a composição do biofertilizante, utilizando a pesagem em uma balança digital. Para cada 500 g de material, foi diluído em um litro de água e aplicado nas palmeiras, de acordo com a metodologia de (MEDEIROS 2002).

Borges (2021) afirma que as cascas de banana, feijão, milho e esterco de vaca contêm uma variedade de nutrientes úteis para fertilizantes do solo. A casca de banana é uma excelente fonte de potássio, um macronutriente essencial para o crescimento das plantas. O potássio desempenha um papel vital na regulação da absorção de água e nutrientes, no desenvolvimento das raízes e na resistência das plantas ao estresse. Além disso, as cascas de banana também contêm fósforo, outro nutriente importante para o crescimento saudável das plantas.

O feijão é uma excelente fonte de nitrogênio, um dos principais micronutrientes necessários para o crescimento das plantas. O nitrogênio é um componente vital das proteínas, enzimas e clorofila, desempenhando um papel fundamental na fotossíntese e no crescimento geral da planta. Assim como as cascas de banana, o feijão também contém fósforo em quantidades significativas.

O milho é igualmente uma boa fonte de nitrogênio, fornecendo um impulso adicional desse importante nutriente para o crescimento das plantas. Além disso, o milho contém potássio, que é essencial para várias funções metabólicas das plantas.

O esterco de vaca é uma rica fonte de nitrogênio orgânico, liberado lentamente no solo à medida que se decompõe, fornecendo um suprimento constante de nitrogênio às plantas ao longo do tempo. Também contém fósforo em quantidades significativas, ajudando no desenvolvimento das raízes e na saúde geral das plantas. Além disso, o esterco de vaca contém potássio, completando a tríade de macronutrientes essenciais para o crescimento das plantas (MEDEIROS, 2002).

Os demais nutrientes, como casca de ovo, restos de folhas secas, cascas de frutas cítricas, cascas de abacate, cascas de mamão e resíduos de coco da praia, foram utilizados como ingredientes para equilibrar as proporções e fornecer uma gama completa de nutrientes necessários para o crescimento saudável das plantas. Além disso, foram encontrados cálcio, magnésio e outros micronutrientes, que foram considerados ao formular essa matéria orgânica.



## 2.4 TESTE DE EFICÁCIA DO BIOFERTILIZANTE

Para testar a eficácia do biofertilizante produzido, foram utilizadas seis espécies de palmeiras (4 indivíduos por espécie) como objeto de estudo, sendo cada uma identificada de acordo com sua espécie. Essa etapa foi realizada em uma área experimental no Rancho Água Fria, município de Ananás, estado do Tocantins.

Para garantir a validade dos resultados e minimizar vieses, foi estabelecido um grupo de controle, composto por 6 espécies e 20 indivíduos, que não receberam a aplicação do biofertilizante, e um grupo experimental, também com 6 espécies e 20 indivíduos, que recebeu a aplicação do biofertilizante.

Após a aplicação do biofertilizante, iniciou-se a coleta de dados e o acompanhamento do desempenho fisiológico das palmeiras. Foram analisados parâmetros como taxa de fotossíntese, transpiração e eficiência no uso da água, além de medidas de crescimento, incluindo altura, diâmetro do tronco e número de folhas. A biomassa total foi avaliada com base em folhas frescas e secas, e a capacidade de sequestro de carbono foi determinada por técnicas como análise de carbono total e quantificação do teor de carbono nas folhas, de acordo com as metodologias de (AREVALO, 2002 e OLIVEIRA, 2007).

No monitoramento ambiental, foram registrados dados relevantes como temperatura, umidade e intensidade luminosa, além do diâmetro (em cm), altura (em m) e densidade das palmeiras, para compreender melhor as condições que podem influenciar os resultados. Esses dados foram registrados em fichas e, posteriormente, transformados em tabelas e gráficos.

Para as análises estatísticas, foram utilizados métodos apropriados, como análise de variância (ANOVA) e o teste de Tukey para comparações múltiplas.

## 2.5 ESTRUTURA PARA POTENCIALIZAR A FOTOSSÍNTESE EM PALMEIRAS JOVENS (EMGPALM)

Para melhorar a fotossíntese em palmeiras jovens, foi construída a EMGPALM (Estrutura para Melhoramento Grupo de Palmeiras Jovens). A estrutura é composta por uma câmara de acrílico com 50 cm de comprimento, 40 cm de altura e 8 cm de largura, além de uma placa de acrílico transparente. A câmara foi dividida em três módulos: dois destinados à experimentação e um destinado ao controle.

Duas baterias de captação de carbono foram instaladas para medir a absorção de carbono pelas palmeiras, tanto nos módulos experimentais quanto no módulo de controle. Dois aquários foram utilizados para indução de CO<sub>2</sub> e clorofila líquida, promovendo o crescimento e permitindo a análise das palmeiras. Além disso, cilindros de CO<sub>2</sub> e clorofila foram empregados para manipular e ajustar

as condições ambientais dentro da câmara, simulando diferentes cenários de exposição ao CO<sub>2</sub> e fornecimento de nutrientes.

Para a experimentação, foram anexados à EMGPALM dois tanques de acrílico, com as seguintes dimensões: 15 cm de altura, 16,5 cm de largura e 13 cm de comprimento. Cada tanque está equipado com uma luminária e uma bomba biovolt de LED. Esses tanques são utilizados para receber o CO<sub>2</sub> diluído, produzido a partir de materiais biológicos, que é aplicado no processo de potencialização da fotossíntese das palmeiras.

O primeiro tanque foi equipado com dois kits geradores de CO<sub>2</sub> e uma bomba submersa para aquário modelo Vigoar A300, com capacidade de 450 L/h, destinada a tanques de até 100 L e 110V. O segundo tanque foi equipado com um kit gerador de CO<sub>2</sub> e uma bomba submersa para aquário modelo Vigoar A300, também com capacidade de 450 L/h, para tanques de até 100 L e 110V.

## 2.6 MONITORAMENTO DAS PALMEIRAS

A atividade foi conduzida utilizando exemplares das espécies de palmeiras (folhas) que fazem parte do estudo, tanto aqueles que receberam biofertilizante quanto aqueles que não receberam, garantindo que fossem representativos do ambiente selecionado. O crescimento das palmeiras foi monitorado ao longo de 12 meses, com a quantificação de parâmetros como altura, diâmetro, circunferência, número de folhas, quantidade de clorofila, volume de biomassa e sequestro de carbono.

Os materiais utilizados incluíram drone, GPS, facção, folhas de palmeiras, balança digital para pesar as amostras coletadas, equipamentos de laboratório, reagentes (sal, água destilada, etanol, detergente neutro), câmera fotográfica, lupa, microscópio, fita métrica e caderno de campo. Durante o monitoramento, foi possível quantificar a quantidade de carbono sequestrado por meio da análise da biomassa fresca e seca de cada espécie.

## 2.7 QUANTIFICAÇÃO DE CARBONO NAS AMOSTRAS

Para analisar a quantidade de carbono nas amostras, foram utilizados os métodos descritos por Arevalo (2002) e Oliveira (2007), que quantificaram o carbono orgânico total (COT). O sequestro de carbono foi calculado determinando a quantidade de carbono por unidade de biomassa e por área ocupada pelas palmeiras. Em seguida, utilizando o EMGPALM, aplicou-se o biofertilizante nas palmeiras jovens e nas palmeiras do viveiro experimental, com o uso de uma ficha própria para a identificação dos parâmetros (palmeira, altura, diâmetro, clorofila, número de cloroplastos, biomassa fresca, biomassa seca, biomassa diluída e sequestro de carbono). Para cada palmeira, foram aplicados

100 gramas de nutriente dissolvidos em um litro de água, sendo que cada indivíduo recebeu dois litros de solução com o biofertilizante ao longo de um mês.

Durante esse processo, foram analisados os quatro tipos de biofertilizantes produzidos. As palmeiras que receberam o fertilizante biológico refinado apresentaram um aumento mais rápido na clorofila, ou seja, demonstraram maior biomassa em um período mais curto. Os outros biofertilizantes (granulados) mostraram um efeito mais gradual, mas também foram eficazes.

As variáveis foram controladas para evitar modificações drásticas nos resultados, incluindo as condições de crescimento, a idade das plantas, a quantificação de clorofila, a expressão de biomassa, o sequestro de carbono e outros fatores ambientais. Os experimentos foram repetidos oito vezes para obter resultados mais confiáveis e reduzir a variabilidade experimental, de acordo com os métodos descritos por Quintanilha et al. (2023).

### **3 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

O papel das palmeiras nos ecossistemas pode ser significativamente mais relevante do que as estimativas realizadas até o momento sugerem. Um levantamento abrangente em diversas bases de dados, reunindo informações coletadas por 223 pesquisadores de diferentes países, revelou que as medições de biomassa das florestas podem variar em até 15% para mais ou para menos (KAHN, F. e MEJIA, K., 2020).

#### **3.1 ANÁLISES DAS ESPÉCIES DE ARECÁCEAS (PALMEIRAS) COM MAIOR EFICIÊNCIA NO SEQUESTRO DE CARBONO.**

O conceito de sequestro de carbono foi formulado na Conferência de Kyoto, em 1997, evento que reuniu autoridades de mais de 160 países. Durante essa conferência, foi criado um tratado internacional estabelecendo metas para a redução das emissões de gases de efeito estufa e incentivando o desenvolvimento de tecnologias sustentáveis para converter e reverter o acúmulo de CO<sub>2</sub> atmosférico, com o objetivo de mitigar o efeito estufa (HOUGHTON, R. A., 1994).

Com base nesse pressuposto, foi analisada a quantidade de biomassa disponibilizada pelas palmeiras em quatro quadrantes de 25 x 100 metros, totalizando 109 palmeiras pertencentes a oito espécies diferentes. A média do diâmetro das palmeiras à altura do peito (DAP) foi de 34,96 cm. A biomassa total por palmeira, em toneladas por hectare (BTP/t/ha), foi estimada em 3,37 t/ha, enquanto o carbono da biomassa por palmeira, em toneladas por hectare (CBP/t/ha), foi de 1,6 t/ha.

Conforme Houghton (1994), o diâmetro do caule está diretamente relacionado à área da superfície foliar disponível para a fotossíntese. Uma maior área foliar implica, geralmente, uma maior

capacidade fotossintética, o processo pelo qual as plantas convertem a luz solar em energia. Além disso, o caule das palmeiras pode atuar como um local de armazenamento de nutrientes. Um diâmetro maior sugere uma maior capacidade de armazenamento de recursos, o que favorece o crescimento e o desenvolvimento saudáveis da planta.

Para quantificar a biomassa, foram selecionadas as palmeiras com maior número de indivíduos. Esse método permitiu determinar a biomassa fresca por metro quadrado, biomassa seca por metro quadrado, biomassa fresca por grama diluída e biomassa por peso seco de grama diluída, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 2: Indica quatro possibilidades da quantidade de biomassa por palmeira, sendo que os dois primeiros parâmetros indicam folhas verdes e folhas secas; os segundos, cinzas úmidas e cinzas secas. Fonte das informações Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

<b>Palmeiras DAP</b>	<b>Biomassa peso fresco kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Biomassa peso seco kg/m<sup>2</sup></b>	<b>Biomassa peso fresco por grama/diluído (g)</b>	<b>Biomassa peso seco por grama/diluído (g)</b>
Babaçu	10,1	5,5	198	190
Buriti	5,7	2,1	119	110
Coca Najá	9,2	4,1	118	109
Açaí	3,7	1,2	62	58
Tucum	3,6	1,4	52	43
Buritirana	3,1	1,2	15	8

A relação entre a quantidade de biomassa e a quantidade de carbono sequestrado é essencial para entender o papel das plantas na captura e armazenamento de carbono atmosférico. De maneira geral, a biomassa de uma planta é composta predominantemente por carbono, que é um componente fundamental dos compostos orgânicos produzidos durante a fotossíntese. Assim, o aumento da biomassa nas palmeiras está diretamente ligado ao aumento da quantidade de carbono sequestrado, contribuindo para a redução dos níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera e desempenhando um papel crucial no ciclo global do carbono.

### 3.2 ANÁLISES DA QUANTIDADE DE CLOROFILA POR PALMEIRA

As palmeiras desempenham um papel crucial no equilíbrio ambiental, contribuindo significativamente para o sequestro de carbono. Essa capacidade as torna elementos essenciais no combate às mudanças climáticas, uma vez que ajudam a reduzir substancialmente os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Esse processo é favorecido pela estrutura uniforme da copa das palmeiras, que otimiza a absorção de carbono durante a fotossíntese e promove o acúmulo eficiente de clorofila, (KAHN E MEJIA, 2020).

Cada uma dessas espécies apresenta características genéticas distintas, o que sugere que a capacidade de sequestro de carbono pode variar entre elas. Identificar genes específicos nesse contexto

é essencial para compreender e otimizar o potencial de sequestro de carbono das palmeiras. A Tabela 2 ilustra a quantidade de clorofila extraída de 200 gramas de folhas trituradas em diferentes espécies de palmeiras, comparando áreas de solo seco e áreas inundadas.

Palmeiras	Nome científico	>Mv	>Mv	Média	Mg/ml
Açaí	<i>Euterpe oleracea</i>	0.08	0.05	0.13	2,3± 0.4
Buriti	<i>Mauritia flexuosa</i>	0.09	0.05	0.14	2,2±0.5
Buritirana	<i>Mauritiella aculeata</i>	0.07	0.04	0.11	2,1±0.4
Babaçu	<i>Attalea speciosa</i> Mart.	0.08	0.05	0.13	2,3±0.4
Bacaba	<i>Oenocarpus bacaba</i>	0.08	0.05	0.13	2,2±0.5
Coco da praia	<i>Cocos nucifera</i> L.	0.06	0.02	0.08	1,2±0.1
Coco najá	<i>Maximiliana maripa</i>	0.04	0.01	0.05	2,6±0.6
Macaúba	<i>Acrocomia aculeata</i>	0.04	0.02	0.06	2,0±0.5
Piaçava	<i>Attalea funifera</i> Martius	0.05	0.04	0.09	1,0±0.3

\* Resultados da coleta de clorofila analisados em oito experimentos de cada palmeira.

>Mv = Maior valor coletado. >Mv = Menor valor coletado.

Mg/ml = Miligrama por mililitro

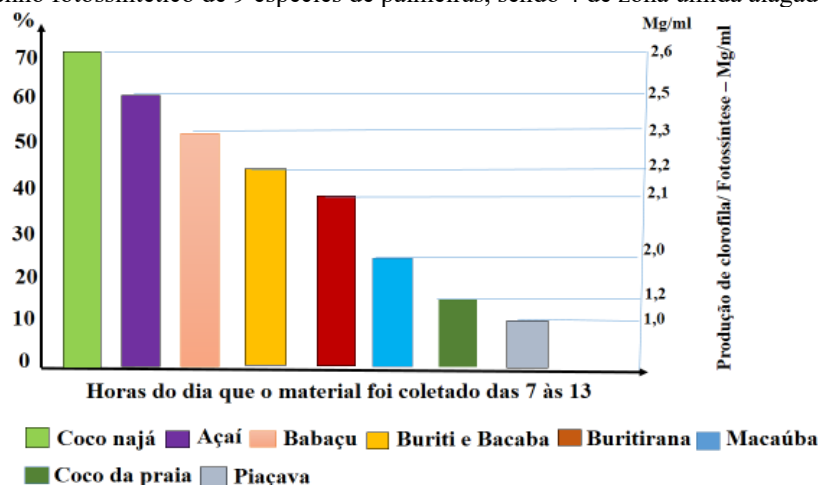
± Variação.

Fonte: Autor.

Os genes desempenham um papel fundamental na eficiência com que as palmeiras realizam a fotossíntese, processo pelo qual convertem dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e água em glicose e oxigênio, utilizando a energia solar. A variação genética pode influenciar a taxa e a eficiência da fotossíntese em diferentes espécies de plantas, afetando diretamente a quantidade de carbono que elas são capazes de capturar da atmosfera (MESQUITA et al., 2001).

Pesquisas recentes identificaram genes específicos em várias espécies de palmeiras, diretamente relacionados ao sequestro de carbono. Esses genes estão envolvidos em processos como a fixação de carbono, o transporte de metabólitos e a regulação da fotossíntese. O Gráfico 1 ilustra o desempenho das palmeiras na realização da fotossíntese (sequestro de carbono), com base na extração de clorofila em sete experimentos realizados. A coleta do material ocorreu entre as 7h e as 13h.

**Gráfico 1:** Desempenho fotossintético de 9 espécies de palmeiras, sendo 4 de zona úmida alagadiça e 5 de zona árida.



Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

A coluna verde no gráfico representa o desempenho fotossintético da palmeira coco najá, uma espécie adaptada a áreas secas, enquanto a coluna lilás retrata a palmeira de açaí, que cresce em zonas úmidas e alagadas. Ambas as espécies apresentaram a maior quantidade de clorofila por mililitro, com a média dos sete experimentos realizados entre as 7h e as 13h. A palmeira coco najá obteve os melhores resultados (2,6 mg/ml – 70%) devido à sua copa uniforme, palhas longas, com mais de 2 metros, e, em média, 12 folhas por estipe.

Ao analisar o gráfico, observa-se que as demais palmeiras apresentaram resultados satisfatórios, sendo a palmeira de piaçava a que obteve os menores resultados em todos os experimentos (1,0 mg/ml – 20%). Esse resultado está relacionado ao tamanho médio da palmeira (2m), que recebe sombra das demais árvores, principalmente pela manhã. De acordo com Goulding & Smith (2007), a presença de sombra pode afetar a capacidade das árvores de realizar a fotossíntese de maneira eficiente, pois a redução da intensidade da luz disponível pode levar a uma diminuição na produção de clorofila e, consequentemente, na eficiência da fotossíntese.

As palmeiras que apresentaram resultados não uniformes (oscilações) foram aquelas localizadas em áreas alagadas ou próximas a regiões alagadas (coco najá, açaí, buriti, buritirana e bacaba). A curvatura nas análises de clorofila pode depender de diversos fatores, como a espécie específica de palmeira, condições do solo, clima, entre outros. A clorofila, substância responsável pela fotossíntese nas plantas, pode ter sua produção influenciada por diversos fatores ambientais.

Em zonas mais úmidas, as plantas podem enfrentar uma competição mais intensa por luz solar devido ao crescimento exuberante da vegetação ao redor. Isso pode levar as plantas, incluindo as palmeiras, a desenvolverem estratégias para otimizar a absorção de luz. Uma dessas estratégias pode ser a curvatura das folhas, que permite uma exposição mais eficiente à luz solar, favorecendo a

produção de clorofila e, conseqüentemente, aumentando a eficiência da fotossíntese (GOULDING & SMITH, 2007).

### 3.3 FREQUÊNCIA DE GENES RESPONSÁVEIS PELOS SEQUESTRO DE CARBONO EM PALMEIRAS

Diante dos resultados obtidos, foram analisadas as frequências de genes responsáveis pelo sequestro de carbono em seis espécies de palmeiras que apresentaram maior incidência na área estudada (buriti, açaí, buritirana, coco-najá, babaçu e bacaba). Nas análises microscópicas, observou-se que as palmeiras analisadas pertencem ao grupo C4. As plantas C4 possuem adaptações especiais no processo de fotossíntese, otimizando a eficiência em ambientes quentes e secos.

O termo "C4" refere-se ao fato de que essas plantas utilizam um ciclo de quatro carbonos para a fixação inicial do carbono durante a fotossíntese, em contraste com as plantas C3, que utilizam um ciclo de três carbonos. Essa adaptação ajuda as plantas C4 a superar a fotoinibição em condições de alta luminosidade e altas temperaturas (CARVALHO et al., 2010).

Ao analisar o material coletado (clorofila) utilizando um microscópio eletrônico com objetiva de 100x/1,25, observou-se em todas as palmeiras a presença da enzima considerada mais eficiente na fixação de carbono, a PEP carboxilase. A PEP carboxilase (fosfoenolpiruvato carboxilase) é uma enzima crucial no metabolismo fotossintético conhecido como ciclo do ácido das crassuláceas, ou simplesmente metabolismo C4.

O metabolismo C4 permite que as palmeiras otimizem a fixação de carbono sob altas temperaturas e condições de luminosidade intensa, reduzindo a perda de água por transpiração e aumentando a eficiência fotossintética em comparação com as plantas C3 em determinados ambientes. A PEP carboxilase atua em conjunto com outras enzimas em células específicas chamadas células do mesófilo para fixar o CO<sub>2</sub> em moléculas de ácido oxaloacético. Essas moléculas são transportadas para células do feixe vascular, onde o CO<sub>2</sub> é liberado e utilizado pela RuBisCO (enzima ribulose-1,5-bisfosfato carboxilase/oxigenase) no ciclo de Calvin-Benson.

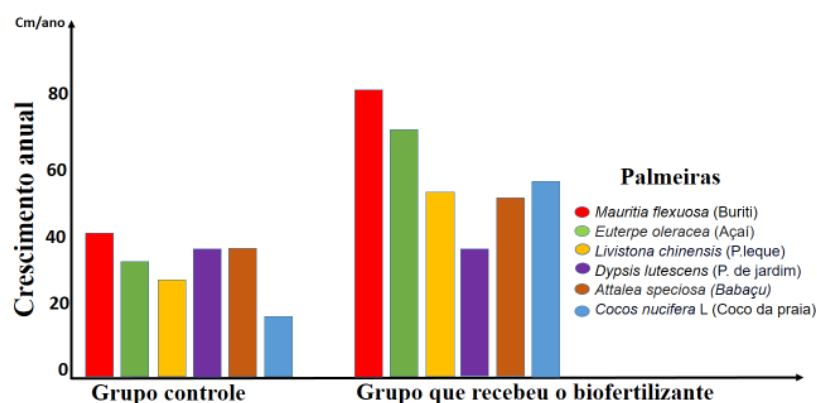
### 3.4 O IMPACTO DA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE BIOLÓGICO EM PALMEIRAS

O uso de biofertilizantes em palmeiras apresenta benefícios significativos para o aumento do sequestro de carbono. Esses fertilizantes fornecem nutrientes essenciais às plantas, como nitrogênio, fósforo e potássio, que, ao serem assimilados, promovem um crescimento mais saudável das palmeiras. Esse desenvolvimento favorece o aumento da biomassa e, conseqüentemente, a capacidade de sequestro de carbono.



Após a aplicação do biofertilizante, foi analisado o desempenho das palmeiras em termos de crescimento, aumento do diâmetro, número de folhas, biomassa acumulada e sequestro de carbono. Comparativamente, o grupo controle apresentou crescimento mais lento em relação às palmeiras que receberam biofertilizante duas vezes por mês (DBFT/mês) e irrigação com água três vezes por semana (APS/L). Os resultados dessas análises são apresentados nos Gráficos 02 e 03.

**Gráfico 02:** Comparação do crescimento anual (em centímetros) das palmeiras entre o grupo controle, que não recebeu biofertilizante, e o grupo tratado com doses regulares de biofertilizante.

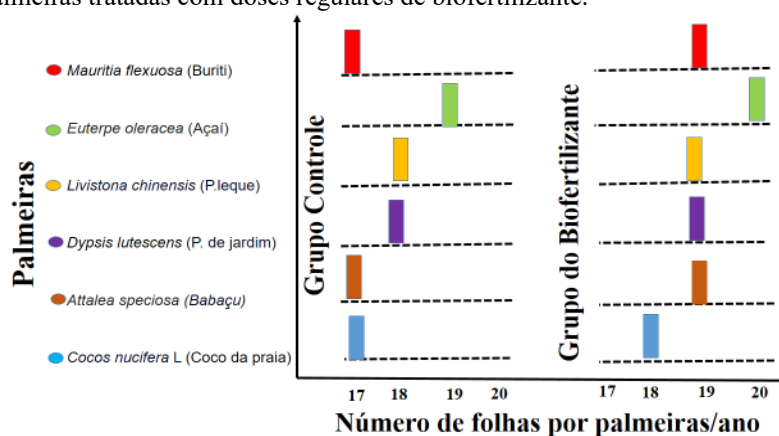


Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

A análise da diferença significativa no crescimento das palmeiras entre os dois grupos é essencial. O grupo tratado com biofertilizante apresentou um crescimento superior ao grupo controle, indicando que o biofertilizante teve um impacto positivo no desenvolvimento das plantas. A interpretação dos gráficos fornece informações valiosas sobre o potencial do biofertilizante em promover o crescimento das palmeiras, com implicações que vão desde melhorias na agricultura até estratégias para promover a sustentabilidade ambiental. Entretanto, é importante interpretar os resultados com cautela, considerando a validade do estudo e a necessidade de mais experimentos para validar os achados.

O Gráfico 03 ilustra a quantidade de folhas em cada grupo. O grupo controle manteve uma média de 17 a 19 folhas por palmeira ao longo de um ano, enquanto o grupo tratado com biofertilizante apresentou um aumento, registrando entre 18 e 20 folhas por palmeira. Esses resultados sugerem que a aplicação do biofertilizante teve um efeito positivo na produção foliar das palmeiras.

**Gráfico 03:** Comparação do número de folhas ao longo de um ano entre as palmeiras do grupo controle, que não receberam biofertilizante, e as palmeiras tratadas com doses regulares de biofertilizante.



Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

As taxas de crescimento foram baseadas nos resultados acompanhados ao longo de um ano, considerando três fatores principais: a dosagem de biofertilizante, a quantidade de água aplicada a cada palmeira e as diferenças entre as espécies. O grupo controle apresentou um número médio de folhas por palmeira entre 17 e 19 durante o período de um ano, enquanto o grupo experimental, que recebeu biofertilizante, teve um número médio entre 18 e 20 folhas por palmeira. Essa diferença sugere que o biofertilizante teve um efeito positivo nas células foliares das palmeiras, resultando em um aumento no número de folhas.

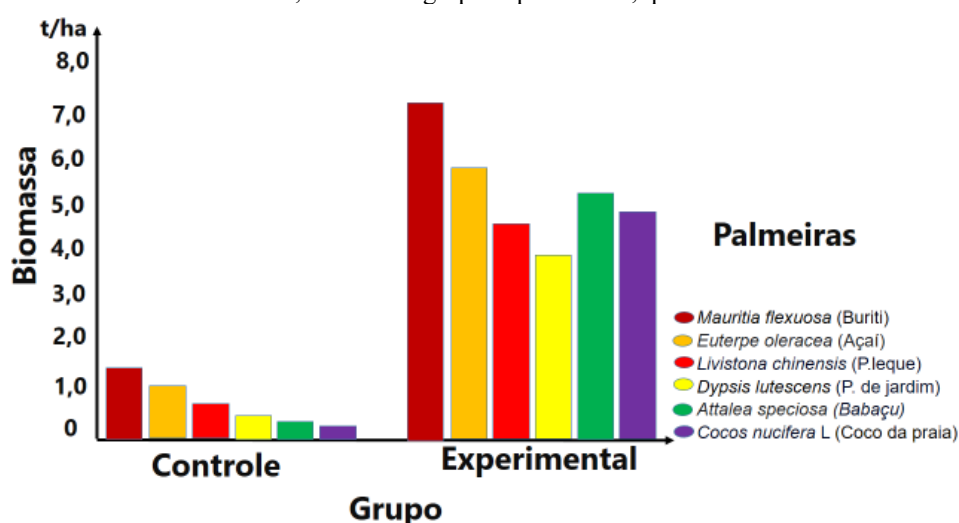
Entretanto, é importante considerar que há variação natural no número de folhas entre diferentes espécies de palmeiras. Portanto, a diferença observada entre os dois grupos pode ser atribuída tanto ao efeito do biofertilizante quanto à variação inerente entre as espécies e ao habitat natural de cada palmeira. Além disso, observou-se que palmeiras jovens tendem a crescer mais rapidamente do que as mais velhas. Condições ideais de crescimento, como solo fértil (com biofertilizante), irrigação adequada e proteção contra ventos fortes, aumentam significativamente a taxa de crescimento. Em contraste, as palmeiras do grupo controle, que não receberam irrigação adequada nem biofertilizante, apresentaram crescimento mais lento, folhas amareladas e baixo teor de clorofila.

Os biofertilizantes são produtos derivados de fontes orgânicas e microrganismos que melhoram a fertilidade do solo e a saúde das plantas. Eles contribuem para o crescimento das palmeiras e o aumento de sua biomassa de várias maneiras. Melhoram a saúde do solo, aumentam a disponibilidade de nutrientes essenciais e estimulam o crescimento das plantas por meio de mecanismos naturais. Os biofertilizantes desempenham um papel crucial no desenvolvimento

sustentável da agricultura, incluindo o cultivo de palmeiras, resultando em plantas mais saudáveis, com melhor crescimento e maior produção de biomassa (CARVALHO et al., 2010).

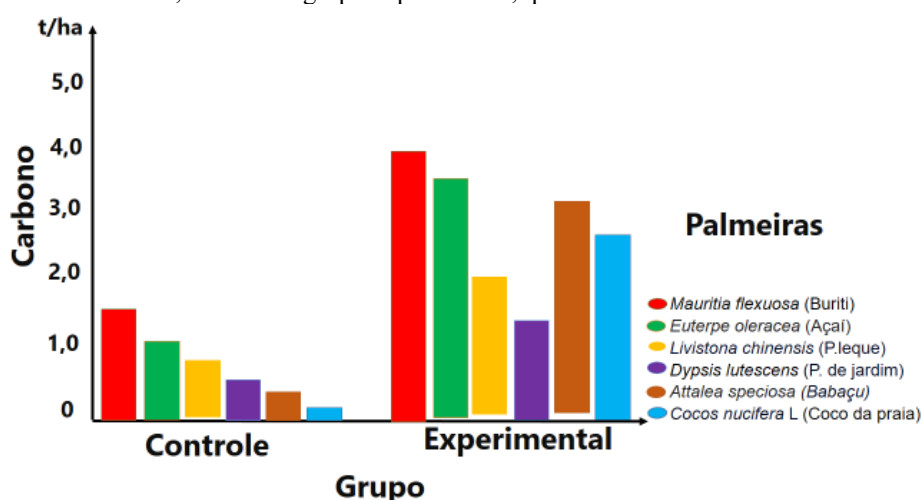
Os Gráficos 04 e 05 mostram resultados positivos para um grupo de seis espécies de palmeiras, que apresentaram aumento na produção de biomassa e no sequestro de carbono após o recebimento de biofertilizante e irrigação três vezes por semana. Esses resultados foram obtidos em um estudo experimental controlado, comparando com um grupo que não recebeu essas mesmas variáveis.

**Gráfico 04:** Apresenta o número de toneladas de biomassa por hectare por ano, comparando as palmeiras do grupo controle, que não receberam biofertilizante, com as do grupo experimental, que receberam doses de biofertilizante.



Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

**Gráfico 05:** Apresenta o número de toneladas de carbono por hectare por ano, comparando as palmeiras do grupo controle, que não receberam biofertilizante, com as do grupo experimental, que receberam doses de biofertilizante.



Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

Os resultados desses gráficos demonstram claramente que a aplicação de biofertilizante e a irrigação regular tiveram um impacto positivo na produção de biomassa e no sequestro de carbono em

palmeiras. De acordo com Borges (2021), esses resultados são consistentes com a literatura existente, que destaca os benefícios do uso de biofertilizantes e práticas de irrigação eficientes na agricultura e na silvicultura.

Uma das observações mais significativas foi o aumento substancial na biomassa das palmeiras do grupo experimental em comparação com o grupo controle. A aplicação de biofertilizante forneceu nutrientes essenciais de forma mais biodisponível, promovendo um crescimento mais vigoroso das plantas. Além disso, a irrigação regular garantiu um suprimento adequado de água, otimizando os processos fisiológicos das palmeiras e maximizando a taxa de crescimento.

Outro aspecto notável foi o aumento no sequestro de carbono nas palmeiras do grupo experimental. O biofertilizante e a irrigação regular não só estimularam o crescimento das palmeiras, mas também aumentaram sua capacidade de capturar e armazenar carbono atmosférico. Este é um resultado altamente desejável, considerando o papel crucial que o sequestro de carbono desempenha na mitigação das mudanças climáticas.

É importante ressaltar que os resultados observados podem ser atribuídos não apenas à aplicação de biofertilizante e água, mas também à interação complexa entre vários fatores, como o tipo de solo, as condições climáticas e as características genéticas das palmeiras. No entanto, este estudo forneceu evidências sólidas de que o uso dessas práticas agrícolas sustentáveis pode desempenhar um papel significativo no aumento da produtividade vegetal e na redução do impacto ambiental.

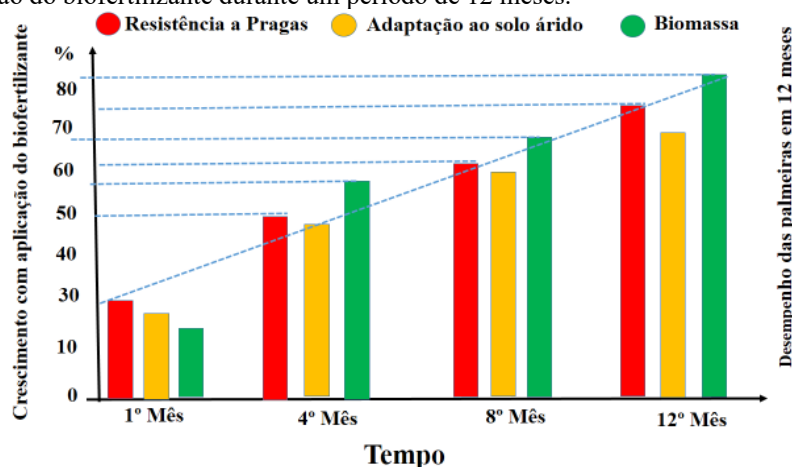
Apesar dos resultados promissores, é importante reconhecer que ainda há questões a serem abordadas. Por exemplo, é necessário investigar os efeitos a longo prazo da aplicação contínua de biofertilizantes e água na saúde do solo e na biodiversidade local (cerrado). Além disso, devem ser considerados aspectos econômicos e logísticos na implementação dessas práticas em escala comercial agropecuária.

Assim, os resultados mostram o potencial das práticas agrícolas sustentáveis, como o uso de biofertilizantes e a irrigação eficiente, para promover o crescimento saudável das palmeiras e atenuar as emissões de carbono. Esses resultados fornecem uma base sólida para futuras pesquisas e para a implementação de estratégias de manejo ambientalmente responsáveis em ecossistemas agrícolas e florestais.

### 3.5 ANÁLISE DOS EFEITOS BIOTECNOLÓGICOS DO BIOFERTILIZANTE NAS INTERAÇÕES PLANTA-AMBIENTE, CONSIDERANDO FATORES COMO RESISTÊNCIA A ESTRESSES AMBIENTAIS, ADAPTAÇÃO A DIFERENTES CONDIÇÕES CLIMÁTICAS E INTERAÇÕES COM MICRORGANISMOS DO SOLO

O uso de biotecnologia, por meio da aplicação de biofertilizantes (que fornecem macronutrientes), possibilitou que as espécies de palmeiras se tornassem mais resistentes a pragas, doenças e condições ambientais adversas. Isso contribuiu para o aumento do número de folhas. As células das palmeiras apresentaram um incremento notável na concentração de clorofila, resultando em um crescimento da biomassa e maior eficiência no sequestro de carbono. Além disso, a manipulação genética, facilitada pela aplicação controlada do biofertilizante, melhorou a composição nutricional das palmeiras, tornando-as mais nutritivas e adaptadas a diferentes condições de solo e clima da região do cerrado (ver Gráfico 06).

**Gráfico 06:** Destaca o crescimento da biomassa das palmeiras, sua resistência às pragas e a adaptação ao solo árido do cerrado após a aplicação do biofertilizante durante um período de 12 meses.



Fonte: Luís Gustavo Neres Ferreira Soares.

As metodologias biotecnológicas podem conferir às plantas maior resiliência a estresses abióticos, como déficit hídrico, salinização edáfica e oscilações térmicas, fatores determinantes para a sustentabilidade agrícola em distintos ecossistemas (Cirino, 2021). Dessa forma, a engenharia genética também pode ser empregada para potencializar a biomassa em Arecáceas, viabilizando sua conversão em biocombustíveis e promovendo fontes energéticas renováveis.

As aplicações biotecnológicas do biofertilizante desenvolvido neste estudo possibilitam às palmeiras selecionadas uma adaptação superior a condições ambientais adversas, como estiagem, salinidade do substrato e variações térmicas. Tal efeito é evidenciado pelo incremento na tonalidade

esverdeada das folhas, indicativo de maior concentração de clorofila, o que intensifica a fixação de carbono e aprimora a fertilidade do solo em que essas espécies estão inseridas.

A administração do insumo biológico resultou na otimização estrutural dos cloroplastos, tornando-os mais tolerantes a estresses ambientais. Por exemplo, genes associados à resistência à seca, provenientes de espécies adaptadas a biomas áridos, foram incorporados a culturas suscetíveis ao déficit hídrico. Entre as palmeiras avaliadas, destacaram-se como mais adaptáveis o babaçu (*Attalea speciosa*), o coco-najá (*Acrocomia intumescens*), o tucum (*Astrocaryum vulgare*) e a macaúba (*Acrocomia aculeata*), espécies que demonstraram maior aptidão ao solo ácido característico do Cerrado maranhense e tocantinense.

Essa estratégia proporcionou ferramentas inovadoras para incrementar a tolerância das Arecáceas a fatores ambientais adversos, promovendo a sustentabilidade agroecológica e impulsionando a resiliência dessas espécies em diferentes biomas.

### 3.6 EFEITO DA MELHOR TAXA DE FOTOSSÍNTESE EM PALMEIRAS JOVENS (EMGPALM)

O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> pode melhorar a taxa de fotossíntese, resultando em um crescimento mais rápido das palmeiras. Os biofertilizantes, por sua vez, apresentaram benefícios significativos, como a melhoria na resistência das palmeiras a doenças e pragas, além do aumento da saúde geral das plantas. O CO<sub>2</sub> contribui para uma maior robustez das palmeiras, tornando-as mais resistentes a estresses ambientais.

Observou-se um equilíbrio nutricional entre as palmeiras dos módulos dois e três, que apresentaram crescimento superior às palmeiras do módulo um, com uma altura adicional de 3 cm e cinco folhas, duas a mais que as palmeiras do módulo controle. O uso de biofertilizantes e CO<sub>2</sub> foi realizado de maneira equilibrada para evitar o excesso de nutrientes ou CO<sub>2</sub>, prevenindo possíveis prejuízos às palmeiras do módulo experimental.

Os custos de produção e aplicação de biofertilizantes e CO<sub>2</sub> foram avaliados para garantir a viabilidade econômica e a sustentabilidade a longo prazo. O uso de bicarbonato de sódio, ácido cítrico e fermento biológico para gerar CO<sub>2</sub> foi feito de forma controlada, para evitar impactos ambientais negativos, o que foi confirmado pela captação de carbono diluído nas baterias do EMGPALM.

A utilização de biofertilizantes e CO<sub>2</sub> adicional pode trazer muitos benefícios para o melhoramento genético de palmeiras jovens, promovendo um crescimento mais rápido, maior resistência a doenças e melhor qualidade do solo. Após um ano de experimento, as palmeiras apresentaram um crescimento de até 2 metros a mais em comparação com as palmeiras do grupo controle.

### 3.7 MONITORAMENTO DO SEQUESTRO DE CARBONO EM PALMEIRAS QUE RECEBERAM AS DOSES DE BIOFERTILIZANTE, COMPARADO ÀS QUE NÃO RECEBERAM (CONTROLE)

Ao longo do ano, foram monitoradas as espécies selecionadas para receber o biofertilizante e aquelas que não foram tratadas. Constatou-se que as palmeiras submetidas à aplicação do insumo biológico apresentaram coloração verde-escura, indicando maior concentração de clorofila, o que sugere um aumento na densidade de cloroplastos por célula.

Durante o monitoramento, as palmeiras tratadas com o biofertilizante registraram um crescimento médio mensal de 7,5 cm e uma concentração média de clorofila de 2,3 mg/ml. Em contraposição, os espécimes do grupo controle exibiram um crescimento médio de 3,6 cm e um teor médio de clorofila de 0,9 mg/ml.

A quantificação da clorofila nas folhas foi essencial, uma vez que esse pigmento está diretamente correlacionado à taxa fotossintética das plantas. Durante a fotossíntese, ocorre a fixação de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e a liberação de oxigênio molecular ( $\text{O}_2$ ), um processo contínuo ao longo do ciclo vegetal. O acompanhamento permitiu estimar a quantidade de carbono assimilado por meio da análise da biomassa fresca e seca de cada espécie, mensurada em toneladas por hectare anualmente.

Além disso, verificou-se que as palmeiras desempenham um papel fundamental na manutenção da biodiversidade local, atraindo diversas espécies da fauna e flora e promovendo o equilíbrio ecológico. Esse efeito está associado ao ciclo biogeoquímico das palmeiras, que capturam  $\text{CO}_2$  atmosférico durante a fotossíntese e o incorporam à sua biomassa. Nesse processo, o carbono assimilado é convertido em carboidratos estruturais, como glicose e amido, essenciais para o metabolismo vegetal e para a sustentação de outras espécies. Durante a decomposição de folhas, frutos e troncos, os nutrientes são reintegrados ao solo, enriquecendo a disponibilidade de compostos essenciais para a vegetação circundante.

Algumas espécies de palmeiras desempenham um papel crucial no sequestro de carbono, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas. Esse processo ocorre devido à capacidade dessas plantas de armazenar carbono em seus tecidos vegetais ao longo do crescimento. O formato singular da copa, caracterizado pela ausência de ramificações, otimiza a absorção da radiação solar, favorecendo a eficiência fotossintética. Além disso, suas folhas largas e compactas maximizam a produção de biomassa, ampliando sua capacidade de fixação de  $\text{CO}_2$ .

Com uma ocupação média de 160  $\text{cm}^2$  por indivíduo na superfície do solo, essas espécies são altamente adaptáveis a extensas áreas agrícolas, desde que o espaçamento permita a mecanização das lavouras. Além disso, constatou-se que seu cultivo pode ser integrado a sistemas agropecuários sem



prejudicar a criação de animais, mantendo o solo enriquecido em nutrientes por meio da dinâmica do sequestro de carbono. Essa interação promove a conservação ambiental e contribui para a redução dos impactos do efeito estufa.

De acordo com Grattapaglia (2023), os biofertilizantes desempenham um papel estratégico no aumento da fixação de carbono e na sustentabilidade agrícola. Compostos por resíduos orgânicos, esses insumos fornecem macro e micronutrientes essenciais para as plantas, estimulando o crescimento vegetativo e promovendo a acumulação de biomassa, especialmente de carbono, que é assimilado durante a fotossíntese.

Sob a perspectiva genética, a aplicação de biofertilizantes pode modular a expressão de genes envolvidos no metabolismo e no desenvolvimento vegetal. Houghton (1994) destaca que a microbiota edáfica exerce influência significativa sobre a regulação gênica das plantas, impactando processos fisiológicos como a absorção de nutrientes, a resistência a fitopatógenos e a arquitetura radicular. Dessa forma, ao favorecer a diversidade microbiana do solo por meio da adição de biofertilizantes, é possível otimizar a performance genética das palmeiras jovens, tornando-as mais eficientes na captura e armazenamento de carbono atmosférico.

#### **4 CONCLUSÃO**

A aplicação de biofertilizantes demonstrou elevada eficácia na otimização da funcionalidade dos cloroplastos, resultando em um incremento significativo na taxa fotossintética das espécies de Arecáceas selecionadas para o experimento. Esse aprimoramento fisiológico favoreceu um desenvolvimento vegetativo mais robusto, refletindo-se no aumento da biomassa foliar e no fortalecimento das reservas nutricionais, impulsionado pelo sequestro de carbono.

Concluindo, a integração da biotecnologia ambiental às Arecáceas, combinada com o uso de biofertilizantes e a manipulação controlada da clorofila e do CO<sub>2</sub> diluído, revela-se uma estratégia inovadora e altamente promissora para maximizar a captura de carbono atmosférico. Essa abordagem não apenas contribui para diminuir os impactos das mudanças climáticas, mas também fomenta a sustentabilidade ambiental em sistemas agroecológicos. Além disso, a ampliação do sequestro de carbono em plantas geneticamente aprimoradas pode viabilizar a geração de créditos de carbono adicionais, passíveis de negociação por empresas e nações para compensação de suas emissões de CO<sub>2</sub>, alinhando-se às diretrizes de acordos internacionais, como o Acordo de Paris.

## REFERÊNCIAS

- AREVALO, L. A.; ALEGRE, J. C.; VILCAHUAMAN, L. J. M. Metodologia para estimar o estoque de carbono em diferentes sistemas de uso da terra. Embrapa, Colombo Paraná 2002.
- BORGES, W. L. Produção e uso de biofertilizantes. 1. ed. Macapá, AP. Embrapa 2021.
- CARVALHO, João Luís Nunes et al. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, v. 34, nº 2, p. 277-289, abr. 2010.
- CIRINO, Ednaldo, VEIGA, Lara; ALVES, Antunes; Milena. O USO DE FERTILIZANTES E SEUS IMPACTOS AMBIENTAIS. ETEC Benedito Storani Jundiaí – SP. 2021
- DAVID GIBBS, NANCY HARRIS and FRANCES SEYMOUR. By the Numbers: The Value of Tropical Forests in the Climate Change Equation. 2018. World Resources Institute
- FERREIRA, L.V.; VENTICINQUE, E.; DE ALMEIDA, S.S. 2005. O Desmatamento na Amazônia e a importância das áreas protegidas. Estudos Avançados 19(53): 1-10
- PHILIP, T. K.; ITODO, I. N., 2006. Acha (*Digitaria* spp.) a “Rediscovered” indigenous crop of West Africa. Agric. Eng. Int.: the CIGR Ejournal. Invited Overview, 8 (23).
- FHILIP, P.M. 2002. Modelos de uso de terra predominantes na Amazônia: Um desafio para sustentabilidade. 103-154. In: A. Rivas & C.E.C. Freitas (eds.) Amazônia: Uma Perspectiva Interdisciplinar. Centro de Ciências do Meio Ambiente, Editora da Universidade do Amazonas (EDUA), Manaus-Amazonas. 271 p.
- FONSECA, J. J. S. (2002). Metodologia da pesquisa científica. Fortaleza: UEC.
- GRATTAPAGLIA, Dário. A biotecnologia e a genômica de espécies florestais no desenvolvimento sustentável das florestas no futuro. Embrapa Amazonas, Manaus, 2023.