



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE LONDRINA
CENTRO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS
Colegiado do CURSO DE CIÊNCIAS BIOLÓGICAS



**Ciências
Biológicas**
UEL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS

JULIA CABRAL DA SILVA

EFEITOS DA APLICAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO NA QUALIDADE MORFOFISIOLÓGICA DE MUDAS DE *Eugenia brasiliensis* SUBMETIDAS À ACLIMATAÇÃO EM SOL PLENO

Londrina – Paraná
2025

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO DE GRADUAÇÃO
EM CIÊNCIAS BIOLÓGICAS**

JULIA CABRAL DA SILVA

**EFEITOS DA APLICAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS
DE CARBONO NA QUALIDADE
MORFOFISIOLÓGICA DE MUDAS DE *Eugenia
brasiliensis* SUBMETIDAS À ACLIMATAÇÃO EM SOL
PLENO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Ciências Biológicas da Universidade Estadual de Londrina como um dos requisitos à obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientador: Halley Caixeta de Oliveira
Coorientadora: Tatiane Viegas Debiasi

Londrina – Paraná
2025

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

da Silva, Julia Cabral.

EFEITOS DA APLICAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO NA QUALIDADE MORFOFISIOLÓGICA DE MUDAS DE *Eugenia brasiliensis* SUBMETIDAS À ACLIMATAÇÃO EM SOL PLENO / Julia Cabral da Silva. - Londrina, 2025.
30 f.

Orientador: Halley Caixeta de Oliveira.

Coorientador: Tatiane Viegas Debiasi.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Biológicas, Graduação em Ciências Biológicas, 2025.

Inclui bibliografia.

1. Nanotecnologia - TCC. 2. Pontos quânticos de carbono - TCC. 3. Estresse Luminoso - TCC. 4. Reflorestamento - TCC. I. de Oliveira, Halley Caixeta . II. Debiasi, Tatiane Viegas. III. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Biológicas. Graduação em Ciências Biológicas. IV. Título.

CDU 574

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Halley Caixeta de Oliveira

Profa. Dra. Tatiane Viegas Debiasi

Prof. Dr. Cristiano Medri

Profa. Dra. Talita Silveira Amador (Suplente)

Londrina, 9 de dezembro de 2025

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,
que me deram suas próprias asas
para que eu pudesse voar mais alto.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Prof. Dr Halley Caixeta de Oliveira, cuja orientação e ensinamentos foram fundamentais em cada passo que dei.

A Prof. Dra. Tatiane Viegas Debiasi por seu apoio e orientação durante os experimentos e desenvolvimento do presente trabalho, sempre pronta a me guiar com dedicação e paciência.

Aos meu pais, Ana Paula e Paulo que com amor e muito esforço, trilharam o caminho para que hoje estivesse aqui. Durante toda minha graduação e vida, foram meu suporte, sem seus incentivos, eu não teria realizado este sonho.

A minha família, especialmente as minhas avós e tia-avó, que me acolheram com sua ternura durante essa fase de graduação e em toda a minha vida.

Ao namorado João, que a graduação me trouxe, compartilhando comigo todos os momentos e me apoiando com seu amor e carinho. Juntos, vivemos este sonho.

Aos amigos que sempre estiveram presentes e aqueles que fiz durante a graduação, que sonharam este sonho ao meu lado e tornaram essa fase da minha vida mais leve.

À Universidade Estadual de Londrina pela minha formação profissional.

À Fundação Araucária/SETI, NAPI Biodiversidade, CNPq e INCT NanoAgro (CNPq e CAPES) pelo apoio durante a realização do presente trabalho.

Aos Prof. Dr. Adriano Buzutti de Siqueira e Prof. Dr. Ailton José Terezo, ao fornecer gentilmente os materiais utilizados na pesquisa.

SILVA, Julia Cabral. **EFEITOS DA APLICAÇÃO DE PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO NA QUALIDADE MORFOFISIOLÓGICA DE MUDAS DE *Eugenia brasiliensis* SUBMETIDAS À ACLIMATAÇÃO EM SOL PLENO.** 2025. 30 fls. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciências Biológicas) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2025.

RESUMO

O desmatamento no Brasil, especialmente na Mata Atlântica, é um problema ambiental crítico, e o reflorestamento é uma estratégia vital para mitigar essa degradação. Este estudo avaliou o efeito da aplicação de Pontos Quânticos de Carbono (*carbon dots*, CDs) na qualidade morfofisiológicas de mudas de *Eugenia brasiliensis* Lam, submetidas à aclimação em sol pleno. Foram comparadas mudas não rustificadas com previamente rustificadas em sol pleno. Foram utilizadas formulações de CDs com emissão na região do azul e verde na concentração de 0,2 mg/mL, além de uma formulação comercial de CDs na mesma concentração. As análises fisiológicas mostraram que, nas mudas não rustificadas, o tratamento com CDs azuis aumentou em 25% a eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m) e em 16% a fluorescência máxima (F_m) em relação ao controle não tratado com CDs. Em contrapartida, nas mudas rustificadas, os CDs verdes mantiveram a eficiência do fotossistema II e induziram um efeito de fotoproteção sob alta irradiação. Os dados biométricos indicaram que as mudas não rustificadas apresentaram um aumento de 18% no comprimento da parte aérea com a aplicação de CDs azuis. A análise de componentes principais (PCA) revelou que as mudas tratadas com CDs (independente do comprimento de emissão) mostraram tendência de melhoria na qualidade morfofisiológica. Os resultados sugerem que os CDs podem otimizar a aclimação das mudas de *E. brasiliensis* ao sol pleno, representando uma abordagem promissora para melhorar a qualidade das mudas utilizadas em projetos de restauração ambiental.

Palavras-chave: Espécies arbóreas nativas; estresse luminoso; fotossíntese; nanotecnologia; reflorestamento.

SILVA, Julia Cabral. **EFFECTS OF APPLYING CARBON QUANTUM DOTS ON THE MORPHOPHYSIOLOGICAL QUALITY OF *Eugenia brasiliensis* SEEDLINGS SUBJECTED TO ACCLIMATIZATION IN FULL SUN.** 2025. 30 pgs. Final Dissertation (Biological Sciences Undergraduation) – Londrina State University. Londrina. 2025.

ABSTRACT

Deforestation in Brazil, especially in the Atlantic Forest, is a critical environmental problem, and reforestation is a vital strategy to mitigate this degradation. This study evaluated the effect of applying Carbon Quantum Dots (CDs) on the morphophysiological quality of *Eugenia brasiliensis* Lam. seedlings subjected to acclimatization in full sun. Unhardened seedlings were compared with those previously hardened in full sun. CD formulations with blue and green emission at a concentration of 0.2 mg/mL were used, in addition to a commercial CD formulation at the same concentration. Physiological analyses showed that, in non-hardened seedlings, treatment with blue CDs increased maximum photochemical efficiency (F_v/F_m) by 25% and maximum fluorescence (F_m) by 16% compared to the untreated control. In contrast, in hardened seedlings, green CDs maintained photosystem II efficiency and induced a photoprotective effect under high irradiance. Biometric data indicated that non-hardened seedlings showed an 18% increase in shoot length with the application of blue CDs. Principal component analysis (PCA) revealed that seedlings treated with CDs (regardless of emission wavelength) showed a trend towards improved morphophysiological quality. The results suggest that CDs can optimize the acclimation of *E. brasiliensis* seedlings to full sun, representing a promising approach to improve the quality of seedlings used in environmental restoration projects.

Keywords: Native tree species; light stress; photosynthesis; nanotechnology; reforestation.

SUMÁRIO

	Pág.
1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1 REFLORESTAMENTOS COM ESPÉCIES NATIVAS E PRODUÇÃO DE MUDAS EM VIVEIRO	3
2.2. CARACTERIZAÇÃO BOTÂNICA E IMPORTÂNCIA DE <i>EUGENIA BRASILIENSIS</i>	4
2.3. ESTRESSE LUMINOSO E ACLIMATAÇÃO	5
2.4 PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO	7
3 MATERIAL E MÉTODOS	8
3.1 MATERIAL VEGETAL	8
3.2 TRATAMENTOS	9
3.3. ANÁLISES FISIOLÓGICAS	10
3.4 ANÁLISES BIOMÉTRICAS	11
3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA	12
4 RESULTADOS	13
4.1 MUDAS DE <i>EUGENIA BRASILIENSIS</i> NÃO RUSTIFICADAS PREVIAMENTE	13
4.2 MUDAS DE <i>EUGENIA BRASILIENSIS</i> RUSTIFICADAS PREVIAMENTE	17
4.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)	20
5 DISCUSSÃO	22
6 CONCLUSÕES	25
REFERÊNCIAS	26

1 INTRODUÇÃO

O desmatamento no Brasil é um sério problema ambiental, de forma que o reflorestamento tem sido pauta de importantes discussões ambientais. A Mata Atlântica é reconhecida como um “hotspot” da biodiversidade, abrigando ecossistemas de elevada diversidade e endemismos (CORREIA, 2024). No entanto, nesse bioma, são encontradas algumas das florestas tropicais mais ameaçadas do planeta (SAFAR et al., 2020). Em particular, a fragmentação florestal causada por atividades humanas tem muitas implicações como a redução de habitat e a perda de biodiversidade (FERREIRA et al., 2019).

O reflorestamento, por meio de mudas arbóreas produzidas nos viveiros florestais, é uma das formas para mitigar o processo de degradação dessas áreas, bem como as mudanças climáticas. A produção de mudas florestais pode ser caracterizada por três fases: germinação, crescimento e rustificação. (STURION e ANTUNES, 2000). Antes de serem plantadas no campo, as mudas devem sofrer um processo de rustificação, que consiste em induzir uma maior resistência das mudas aos fatores ambientais adversos (WENDLING et al, 2006). Nesta etapa, as mudas são transferidas do sombrite parcial, que recebe apenas 50% de intensidade luminosa, para o setor de aclimação ao sol pleno. Dessa forma, estratégias que aumentem a resistência das mudas durante esse processo têm grande potencial de contribuição para o sucesso de programas de reflorestamento.

O rápido desenvolvimento da nanotecnologia permite explorar novos materiais para aprimorar a fotossíntese (GUIRGUIS et al., 2023). Os pontos quânticos de carbono ou “carbon dots” (CDs) são nanomateriais de carbono fotoluminescentes, ou seja, emitem luz em diferentes comprimentos de onda. Eles podem transferir energia para os cloroplastos e acelerar a transferência de elétrons

no fotossistema II, portanto influenciando na fotossíntese e evitando-se a fotoinibição (LI et. al, 2021). Eles apresentam sua intensa absorção óptica na faixa de UV, protegendo as plantas contra essa radiação (YU et al., 2023). Os materiais comerciais atuais que absorvem UV dependem amplamente de recursos não sustentáveis, como metais pesados e produtos químicos provenientes do petróleo (OPOKU et al., 2025). A aplicação de CDs para otimizar a captura de luz nos fotossistemas tem apresentado resultados no aprimoramento da fotossíntese, contribuindo para a captação da luz e o transporte de elétrons pela cadeia de transporte de elétrons fotossintética (GUIRGUIS et al., 2023).

Estudos recentes revelam que tanto as plantas que exigem luz quanto as que toleram a sombra podem demonstrar uma grande capacidade de aclimatar a sua fotossíntese, respondendo a diferentes ambientes de luz (SILVA, 2010). Portanto, a aplicação dos pontos quânticos de carbono em espécies arbóreas nativas como a *Eugenia brasiliensis* Lam., que apresenta tolerância à sombra, pode aprimorar o cultivo dessas mudas em condições adversas, melhorando sua qualidade morfofisiológica e capacidade de sobrevivência em campo.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito da aplicação de CDs de diferentes comprimentos de emissão sobre parâmetros morfofisiológicos de mudas de *E. brasiliensis* submetidas à aclimação ao sol pleno em viveiro, comparando-se mudas previamente rustificadas com mudas recém-transferidas para o sol pleno.

As hipóteses testadas foram: 1) os CDs melhoram a qualidade morfofisiológica das mudas, especialmente das que não passaram por rustificação prévia; e 2) os efeitos dos CDs variam conforme o tipo de luz que emitem.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 REFLORESTAMENTOS COM ESPÉCIES NATIVAS E PRODUÇÃO DE MUDAS EM VIVEIRO

As florestas tropicais representam dois terços da biodiversidade mundial, porém são biomas extremamente fragmentados (GIAM, 2017). No Brasil, as maiores perdas florestais ocorreram na Mata Atlântica, na qual 80% de sua parcela remanescente se encontram em áreas inferiores a 50 hectares (YAAKOBI et al., 2023), sendo que apenas 28% da cobertura vegetal original é preservada (REZENDE et al., 2018).

Nos últimos anos, as alterações climáticas no planeta têm elevado as exigências legais e fomentado a discussão sobre a necessidade de restaurar áreas degradadas e promover a recomposição florestal. Como resultado, houve um aumento na demanda por mudas de espécies arbóreas nativas da flora brasileira (KELLER, et al., 2009). Portanto, a produção de mudas florestais nativas se faz necessária devido ao aumento da demanda por projetos de restauração ambiental (SCALON et al., 2011).

O plantio de mudas, especialmente de espécies nativas em projetos de restauração, pode melhorar a conservação da biodiversidade e aumentar a sustentabilidade dos ecossistemas, pois pode acelerar a regeneração natural de um ecossistema (CHAZDON, 2008). Dessa forma, os viveiros florestais são fundamentais para reduzir os potenciais impactos ambientais negativos e contribuir para o processo de restauração florestal (FONTAN et al, 2020). Para isso, exige-se a produção de mudas com alta qualidade, que pode ser obtida em viveiros por meio de manejo adequado que pode aprimorar seus atributos morfológicos e fisiológicos (RIIKONEN e LOURANEN et al., 2018).

A produção de mudas florestais envolve etapas fundamentais para assegurar sua qualidade (BORUAH., 2025). Inicialmente, as sementes são semeadas e germinam em ambientes controlados; em seguida, as mudas são transferidas do setor com baixa luminosidade e, antes do transplante para o campo, passam por um período de aclimação, no qual são gradualmente expostas ao sol pleno. Essa fase de aclimação em viveiro é fundamental, pois permite que as mudas ajustem sua fisiologia e morfologia às novas condições ambientais, reduzindo o impacto do estresse causado por fatores como alta intensidade luminosa, variações de temperatura e menor disponibilidade hídrica. Sem esse processo, o choque ambiental pode comprometer o desenvolvimento inicial das plantas, diminuindo sua sobrevivência após o plantio.(ROCHA et al., 2019).

2.2. CARACTERIZAÇÃO BOTÂNICA E IMPORTÂNCIA DE *EUGENIA BRASILIENSIS*

Eugenia Brasiliensis Lam (Myrtaceae), conhecida popularmente como grumixama, é uma espécie nativa da Mata Atlântica. A família Myrtaceae possui cerca de 121 gêneros e 5.800 espécies (STEFANELLO et. al., 2011). A grumixama é uma árvore de porte médio, sua distribuição geográfica estende-se desde o sul do estado da Bahia até Santa Catarina, abrangendo uma ampla faixa do território brasileiro (DONATO e MORRETES, 2007).

A espécie apresenta flores brancas, dispostas em copas densas e de formato estreito. O período de floração ocorre entre o final de setembro e o mês de novembro, enquanto a frutificação costuma se dar nos meses de novembro e dezembro. Os frutos de *E. brasiliensis* são comestíveis e apresentam-se em três variedades distintas, classificadas conforme a coloração da casca (NASCIMENTO et al., 2017). Pesquisas recentes mostram que os frutos de *E. brasiliensis* podem

ser considerados uma fonte promissora de antocianinas para uso em alimentos funcionais (JUNIOR et al., 2025). São utilizados também na medicina principalmente por suas propriedades antidiarreicas, antimicrobianas, antioxidantes, antirreumáticas e anti-inflamatórias (LAZARINI et al., 2018). Essas características estão relacionadas à alta concentração de metabólitos secundários e são produzidos em resposta a diferentes estresses ambientais (OLIVEIRA et al., 2025). A sua utilização como modelo para fortalecer a estratégia produtiva e econômica torna-se uma ferramenta significativa para a preservação ambiental (LAMARCA et al., 2020).

2.3. ESTRESSE LUMINOSO E ACLIMATAÇÃO

A aclimação sob sol pleno é uma etapa importante na produção de mudas florestais em viveiros, pois aumenta a resistência das plantas a condições de estresses (ROCHA et al., 2019). Segundo Calzavara et al., (2017) esse processo proporciona alterações em características fisiológicas, anatômicas e morfológicas que podem favorecer o estabelecimento dessas plantas após o transplante para o campo. As áreas desmatadas apresentam intensidade luminosa mais elevadas, e compreender como as espécies respondem a esse fator abiótico é fundamental para avaliar seu potencial de aclimação (DEBIASI et al., 2024). A luz pode se tornar prejudicial quando a quantidade absorvida ultrapassa o necessário para a fotossíntese (TAKAHASHI et al., 2011).

Geralmente, as folhas desenvolvidas sob luz intensa são mais espessas e menores, com parênquimas clorofilianos mais desenvolvidos e maior quantidade de estômatos em comparação com folhas desenvolvidas sob sombreamento (DEBIASI et al., 2024). A plasticidade morfo-anatômica das folhas, especialmente das folhas novas, é crucial para a adaptação ao aumento de luminosidade, enquanto folhas

maduras podem apresentar limitações nessa plasticidade (ZHANG et al., 2018; DEBIASI et al., 2024)

As folhas de sol possuem maior capacidade fotossintética, com maior quantidade de Rubisco e transportadores de elétrons. Essas folhas apresentam uma forte tolerância à luz intensa, devido às altas taxas de assimilação de carbono e à maior capacidade de dissipar o excesso de energia luminosa. Em contrapartida, as folhas de sombra são mais suscetíveis a danos causados pela luz intensa (DEMMIG-ADAMS e ADAMS, 1992). As mudas podem superar o excesso de luz por meio da aclimação de folhas pré-existentes totalmente expandidas ou pelo desenvolvimento de novas folhas que são aclimatadas ao novo ambiente de luz (CALZAVARA et al., 2017).

As folhas velhas geralmente atingiram seu tamanho e espessura máximos, estando no auge de sua capacidade fotossintética. Em contraste, as folhas novas, embora já expandidas, ainda possuem uma estrutura menos lignificada e estão em fase de otimização de sua maquinaria fotossintética. Esta fase é de maior capacidade de adaptação e plasticidade as tornam mais eficientes na utilização da luz após a aclimação (LIU et al., 2016).

Apesar das plantas possuírem mecanismos de regulação da fotossíntese, quando expostas a uma intensidade luminosa excessiva, acima do que podem tolerar, o centro de reação do PSII é desativado e danificado, levando à fotoinibição (TAIZ et al., 2011). A fotoinibição pode ser definida como um conjunto de processos moleculares que promovem a inibição de fotossíntese através do excesso de luz (ALBERTO, 2009). São identificados dois tipos de fotoinibição. A fotoinibição dinâmica é a diminuição reversível da eficiência quântica ocasionada pela dissipação do excesso de energia na forma de calor e fluorescência (*quenching* não

fotoquímico), enquanto a fotoinibição crônica resulta de altos níveis de luz, que danificam o sistema fotossintético e reduzem a eficiência quântica e a taxa fotossintética máxima (TAIZ, et al., 2004).

2.4 PONTOS QUÂNTICOS DE CARBONO

Os pontos quânticos de carbono (carbon dots; CDs) são nanopartículas que foram sintetizados em 2004, durante a produção de nanotubos de carbono, quando o material acabou exibindo fotoluminescência, propriedade que poderia ser explorada para diferentes aplicações. (KUMARI et al., 2025). Esses nanomateriais são nanopartículas com diâmetro inferior a 10 nm (CHAHAL et al., 2021) e destacam-se por sua alta biocompatibilidade, baixa toxicidade e propriedades físico-químicas únicas (ARYAMOL et al., 2024). Uma de suas principais características é a capacidade de absorver e emitir luz quando excitados por ondas eletromagnéticas, o que pode favorecer os processos fotossintéticos.

Estudos recentes têm explorado o uso de nanopartículas, especialmente os nanomateriais à base de carbono, como nanotubos de carbono e CDs, para interagir diretamente com os mecanismos de regulação da fotossíntese (SWIFT et al., 2018). Os CDs podem atuar como agentes antioxidantes, ajudando a neutralizar as espécies reativas de oxigênio (ERO), cuja produção aumenta sob diferentes estresses abióticos (ZIA et al. 2024). Ademais, devido ao seu tamanho e grupos funcionais de superfície, os CDs atuam como carreadores eficientes de nutrientes, aumentando sua absorção pelas raízes e folhas, além de poderem atuar como sensores para pesticidas e herbicidas (KUMARI et al., 2025).

Os CDs podem ser sintetizados a partir de matéria orgânica, então sendo denominados BioC-dots. Esses materiais emitem luz na faixa de 400 a 600 nm

quando expostos à radiação UV (SERAFIM et al., 2025). Essa característica os torna fotossensibilizadores promissores, potencializando a atividade do fotossistema II em plantas. Recentemente, estudos mostraram que os CDs têm a capacidade de reduzir os efeitos da fotoinibição dinâmica em plantas, aumentando a eficiência fotossintética e potencializando o crescimento das plantas em seu estágio inicial. Além disso, eles podem exercer uma influência significativa sobre os parâmetros biométricos das plantas (KAWAZOE 2024; FORTUNA, 2023).

Devido às características fotoluminescentes, os CDs apresentam potencial de aplicação na agricultura e na restauração ecológica. Como são capazes de absorver luz na faixa do ultravioleta, os CDs podem atuar na proteção das plantas contra essa radiação (YU et al., 2023), que pode ser elevada no processo de aclimação e transplante a campo. Além disso, os CDs podem atenuar a fotoinibição ao atuarem na aceleração da transferência de elétrons no fotossistema II, resultando no aumento da fotossíntese, ou seja, na dissipação fotoquímica (LI et. al, 2021).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 MATERIAL VEGETAL

Eugenia brasiliensis Lam. (Myrtaceae) foi a espécie escolhida para essa pesquisa, classificada como não pioneira e caracterizada por crescimento lento e tolerância à sombra. As mudas foram fornecidas pelo viveiro Flora Londrina Viveiro Florestal e mantidas no viveiro do Laboratório de Biodiversidade e Restauração de Ecossistemas (LABRE), ambos localizados na cidade de Londrina, Paraná.

Foram utilizados dois tipos de mudas de *E. brasiliensis*, com o objetivo de comparar o desenvolvimento em diferentes condições de aclimação. Em viveiros florestais, é comum a prática de aclimatar as mudas a diferentes níveis de estresse

luminoso (DEBIASI et al., 2024).

Um grupo de mudas foi composto por aquelas não rustificadas, inicialmente mantidas no setor de crescimento, sob sombreamento parcial, com auxílio de telas de propileno que permitem a incidência de luz de cerca de 50%. Após este período inicial, elas foram transferidas para o setor de rustificação, onde ficaram sob sol pleno para a aclimação ao estresse luminoso. O outro grupo de mudas foi composto por mudas que já passaram previamente por esse processo de aclimação ao sol pleno, tendo sido transferidas novamente para o setor sombreado. Essa comparação permitiu avaliar o impacto da exposição prévia ao estresse luminoso no desenvolvimento das mudas e nos efeitos dos CDs.

3.2 TRATAMENTOS

As formulações de CDs foram disponibilizadas pelos Professores Doutores Adriano Buzutti de Siqueira e Ailton José Terezo, da Universidade Federal do Mato Grosso (UFMT), que utilizaram como matéria-prima resíduos provenientes da suinocultura (SERAFIM et al., 2025). Foram utilizadas duas formulações de CDs, identificadas pelas cores verde e azul, que se referem à região do espectro visível emitida após excitação. Cada formulação foi testada na concentração de 0,2 mg/mL, assim como a Arbolina, um biofertilizante nanométrico disponível comercialmente (Krilltech). O controle foi tratado apenas com água. Todos os tratamentos incluíram a adição de 0,2% de espalhante adesivo. Foram realizadas duas aplicações ao longo do experimento. A primeira aplicação ocorreu antes da transferência das mudas para o setor de rustificação, de forma que foi realizada nas folhas que se desenvolveram em condições de sombra. A segunda aplicação foi realizada 30 dias após a primeira, nas folhas recém-expandidas sob a condição de sol pleno. Em cada tratamento

havia uma repetição de dez mudas e foi realizado o delineamento casualizado por blocos. A aplicação foi feita via pulverização foliar, com borrifadores manuais, sendo aplicados 5 mL por tubete.

3.3. ANÁLISES FISIOLÓGICAS

A medida da fluorescência da clorofila foi feita com o fluorômetro OS1p (OptiSciences), permitindo verificar a eficiência máxima do fotossistema II (razão F_v/F_m) e a existência de fotoinibição. No período da manhã, às 08:00, e ao meio-dia foi feita a primeira medida foi realizada nas folhas expandidas na condição de sombra, 30 dias após a primeira aplicação. A segunda medida foi efetuada 30 dias após a segunda aplicação, nas folhas que se expandiram sob condições de sol pleno no setor de aclimatação. As folhas foram adaptadas ao escuro por 15 min com cliques específicos e a fluorescência inicial (F_0) foi medida na face adaxial da folha. Em seguida, a fluorescência máxima (F_m) foi analisada após pulso de irradiância saturante. Além disso, também foram realizadas as curvas rápidas de luz de ETR (taxa de transporte de elétrons do fotossistema II), durante o período da manhã.

Para a extração de clorofilas e carotenoides, macerou-se 0,05 g de folhas em nitrogênio líquido, que foi homogeneizado em 5 mL de solução de acetona 80% (diluída em tampão fosfato de sódio 2,5 mM, pH 7,8). Logo após, ocorreu a transferência do extrato para um tubo de 15 mL (envolvido em papel alumínio), o qual foi mantido no gelo. Após agitação em vórtex, o extrato foi centrifugado a 4000 rpm por 10 min. Foi adicionado 1 mL do sobrenadante à cubeta e realizada a leitura da absorbância das amostras nos seguintes comprimentos de onda: 663,2 nm, 646,8 nm e 470 nm, utilizando-se a solução de acetona contendo tampão fosfato de sódio.

Por fim, foram realizados os seguintes cálculos para a obtenção da

concentração de clorofila *a* (em µg/mL) (C_a), clorofila *b*, (C_b) e carotenoides totais (C_{x+c}):

$$C_a = (12,25 \times A_{663,2} - 2,79 \times A_{646,8}) (\mu\text{g/mL})$$

$$C_b = (21,5 \times A_{646,8} - 5,1 \times A_{663,2}) (\mu\text{g/mL})$$

$$C_x + c = (1000 \times A_{470} - 1,82 \times C_a - 85,02 \times C_b) / 198 (\mu\text{g/mL})$$

Posteriormente, foram feitos os cálculos para a obtenção das concentrações em mg/g de massa fresca de folha, bem como a determinação da razão clorofila *a/b* e da razão clorofilas/carotenoides.

3.4 ANÁLISES BIOMÉTRICAS

As análises foram realizadas após 60 dias de experimento, sendo utilizadas dez repetições dos seis tratamentos. Foram medidos o comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR), área foliar (AF), diâmetro do caule (DC), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca de folha (MSF) e massa seca total (MST). Além disso, antes do início do experimento, foram realizadas as medições biométricas em cinco repetições de mudas.

Posteriormente, foram realizados os seguintes cálculos:

Taxa assimilatória líquida (TAL), em que:

$$TAL = \frac{((MST - MST_{\text{inicial}}) \times (\ln AFT) - (\ln AFT_{\text{inicial}}))}{(AFT - AFT_{\text{inicial}})} \times \text{tempo do experimento} \times 1000 (\text{mg g}^{-1} \text{ dia}^{-1})$$

Relação massa seca parte aérea/raiz (RPAR MS), na qual:

$$RPAR MS = \frac{MSPA}{MSR} (\text{g g}^{-1})$$

Razão comprimento parte aérea/raiz (RPAR), na qual:

$$RPAR = \frac{CPA}{CR} \text{ (cm cm}^{-1}\text{)}$$

Razão altura/ diâmetro do caule (RAD), na qual:

$$RAD = \frac{CPA}{DC} \text{ (cm mm}^{-1}\text{)}$$

Área foliar específica (AFE), na qual:

$$AFE = \frac{AF}{MSF} \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$$

Razão de área Foliar (RAF), na qual:

$$RAF = \frac{AF}{MST} \text{ (cm}^2 \text{ g}^{-1}\text{)}$$

Para a medição da área foliar (AF), as folhas foram medidas com o auxílio de um medidor de área foliar portátil, modelo LI-3000C (LI-COR © Biosciences, Lincoln, EUA). Para o DC, foi padronizada a medição em 5 cm de altura partindo logo acima da emissão da raiz, com auxílio de um paquímetro digital. A massa seca foi determinada por meio separação do material vegetal em raízes, caules e folhas, colocados individualmente em sacos de papel e levados à estufa a 60 °C. Após a secagem, o material teve a massa medida em uma balança semi-analítica.

3.5 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os dados de Fv/Fm foram transformados em arcosseno da raiz quadrada de x antes das análises. Os dados foram testados quanto à normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk e homogeneidade de variâncias pelo teste de Levene. Posteriormente, os resultados foram submetidos à ANOVA e, quando significativas, as médias foram comparadas pelo teste de LSD ($p < 0,10$). Para as análises, foi utilizado o software agroR Shinny, disponibilizado pela Universidade Estadual de Londrina (UEL). As análises de componentes principais (PCA) foram realizadas utilizando o software PAST 3 (PALEONTOLOGICAL STATISTICS).

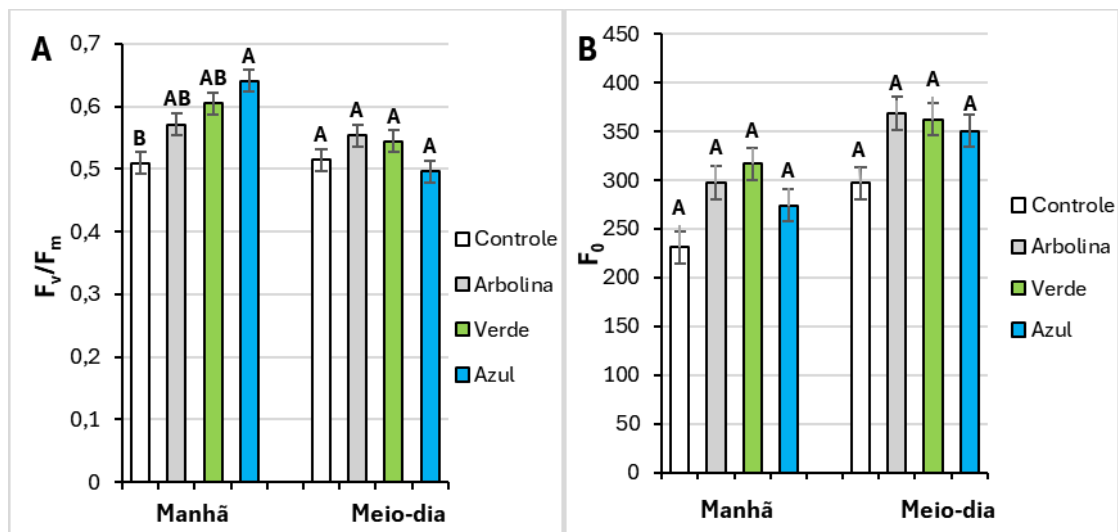
4 RESULTADOS

4.1 MUDAS DE *EUGENIA BRASILIENSIS* NÃO RUSTIFICADAS PREVIAMENTE

Nas análises fisiológicas realizadas com as mudas de *E. brasiliensis* que ainda não haviam sido rustificadas, observou-se que, nas folhas expandidas na sombra, o tratamento com CD azul, no período da manhã, resultou em um aumento de 25% da eficiência fotoquímica máxima do PSII (F_v/F_m), em relação ao controle (FIG. 1A). Ademais, o mesmo tratamento aumentou em 16% a fluorescência máxima (F_m) no período da manhã, em relação ao controle (FIG. 1C). Entretanto, a taxa de transporte de elétrons (ETR) (FIG. 1D) e a fluorescência basal (F_0) (Fig. 1B) não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, tanto no período da manhã quanto ao meio-dia. Nas folhas que se expandiram completamente nas condições de rustificação sob sol pleno, também não foram observadas diferenças significativas na F_v/F_m , F_m , ETR e F_0 durante a manhã. No entanto, ao meio-dia, o tratamento com CD verde e o controle apresentaram aumento de 64% da ETR em comparação aos tratamentos Arbolina e CD azul.

Nas análises de pigmentos fotossintéticos das mudas de *E. brasiliensis* não rustificadas (TABELA 1), observou-se que o tratamento com CD azul incrementou o teor de clorofila *a* em 145% em relação à arbolina. Em relação à clorofila *b*, o mesmo tratamento apresentou 150% a mais em relação ao controle e arbolina. O tratamento CD azul também resultou em 147% de aumento na concentração de clorofila total, em relação a arbolina e CD verde. Já em relação à razão clorofila *a*/clorofila *b* (C_a/C_b), o tratamento com CD verde apresentou uma redução de 18%. Quanto à razão C_{total}/C_{x+c} , o tratamento com CD azul foi 54% superior a arbolina. Entretanto, os níveis de C_{x+c} , os tratamentos não apresentaram diferenças significativas.

Na avaliação dos dados biométricos (TABELA 2), observou-se que, nas mudas de *E. brasiliensis* não previamente rustificadas, o tratamento com CD azul apresentou comprimento da parte aérea (CPA) 18% maior que o controle. No entanto, os tratamentos com CDs azul e verde apresentaram uma redução de 59% do comprimento de raiz (CR) em relação ao controle e arbolina. Em relação à razão parte aérea/raiz (RPAR), o tratamento com CD azul resultou em um aumento de 80% em relação ao controle e arbolina. Os tratamentos com ambos os CDs incrementaram a taxa assimilatória líquida (TAL) em 65% quando comparadas à arbolina. Nos demais parâmetros biométricos avaliados, não foram observadas diferenças significativas entre os tratamentos.



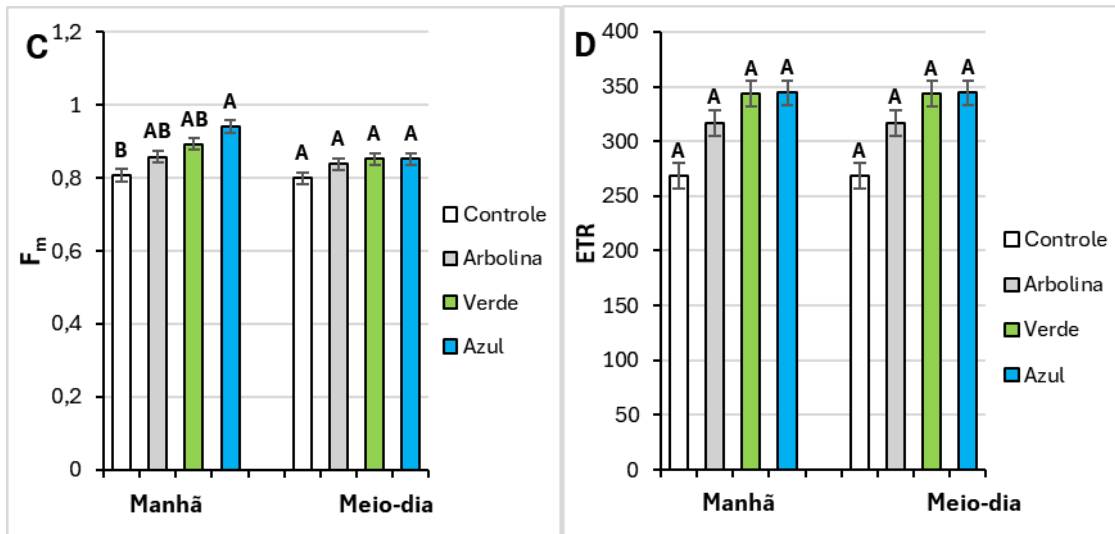
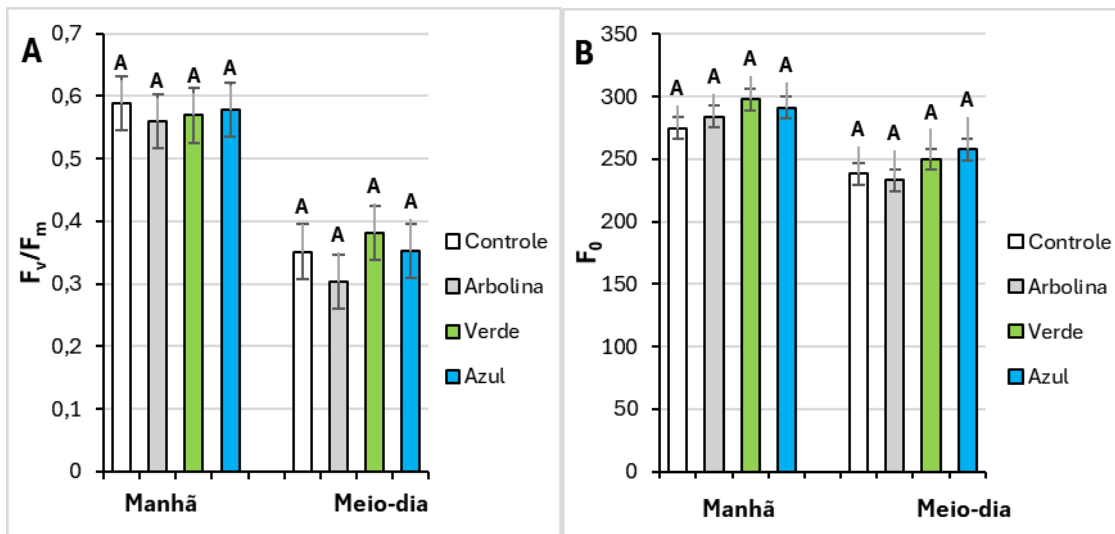


FIGURA 1 A) Eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m), B) fluorescência basal (F_0), C) fluorescência máxima (F_m), D) taxa relativa de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) em mudas de *Eugenia brasiliensis* Lam. não rustificadas previamente, medidos após a primeira aplicação dos tratamentos, em dois momentos do dia (manhã e meio-dia). Colunas verdes representam CDs que emitem luz verde e colunas azuis representam CDs que emitem luz azul. Letras iguais indicam médias iguais de acordo com ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).



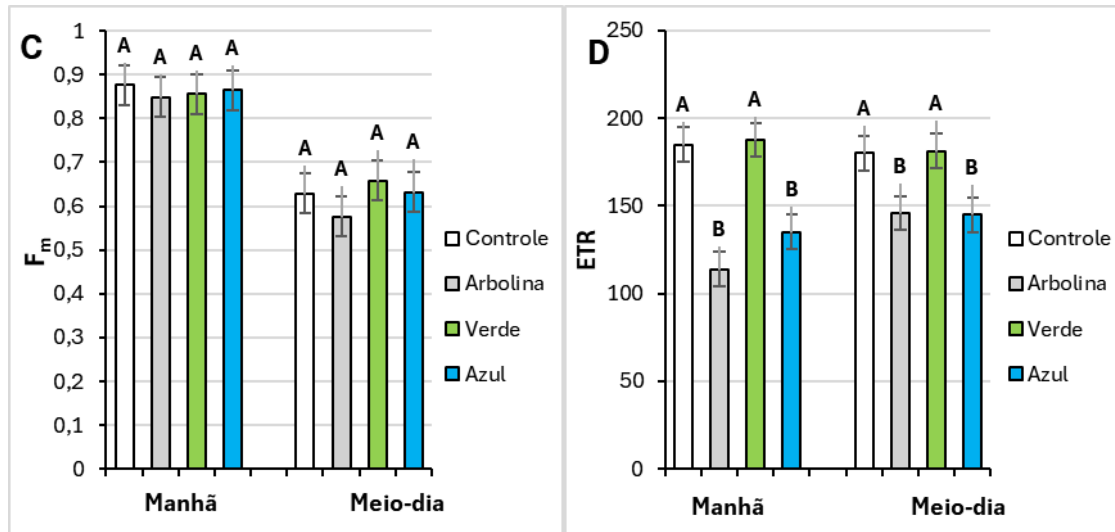


TABELA 1 Clorofila *a* (C_a), clorofila *b* (C_b), clorofila total (C_{total}), razão clorofila *a*/clorofila *b* (C_a/C_b), carotenoides totais (C_x+C), razão clorofila total/carotenoides totais (C_{total}/C_x+c) em mudas de *Eugenia brasiliensis* Lam. não rustificada previamente, Letras iguais não indicam diferenças significativas de acordo com ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).

Parâmetro	Controle	Arbolina	0,2 Verde	0,2 Azul
C_a	0,154 ± 0,03 b	0,118 ± 0,02 b	0,150 ± 0,01 b	0,290 ± 0,13 a
C_b	0,065 ± 0,01 b	0,050 ± 0,01 b	0,071 ± 0,007 ab	0,125 ± 0,06 a
C_{total}	0,219 ± 0,26 b	0,168 ± 0,41 b	0,222 ± 0,23 b	0,415 ± 0,19 a
C_x+c	0,100 ± 0,01 a	0,088 ± 0,01 a	0,098 ± 0,007 a	0,138 ± 0,04 a
C_a/C_b	2,345 ± 0,10 ab	2,502 ± 0,24 a	2,103 ± 0,10 b	2,345 ± 0,05 ab
C_{total}/C_x+c	2,079 ± 0,21 ab	1,842 ± 0,19 b	2,239 ± 0,08 ab	2,844 ± 0,42 a

TABELA 2 Comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR) área foliar (AF), diâmetro do caule (DC), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca de folha (MSF) e massa seca total (MST), taxa assimilatória líquida (TAL), razão parte aérea raiz/massa seca (RPAR MS), razão parte aérea/raiz (RPAR), relação parte aérea/diâmetro do caule (RAD), área foliar específica (AFE), razão de área foliar (RAF) de mudas de *Eugenia Brasiliensis* não rustificadas anteriormente. Os dados foram expressos como média ± erro padrão ($n = 15$). Letras iguais na mesma coluna indicam médias iguais, com base em ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).

Parâmetro	Controle	Arbolina	0,2 Verde	0,2 Azul
CPA	17, 5 ± 1,13 b	19,1 ± 1,03 ab	20,2 ± 1,18 ab	20,9 ± 0,75 a
CR	20, 9 ± 1,55 a	18,9 ± 1,82 a	13,1 ± 0,27 b	13,4 ± 1,17 b
DC	3,57 ± 0,26 a	3,60 ± 0,23 a	3,87 ± 0,24 a	3,45 ± 0,27 a
AF	116, 2 ± 14,1 a	102,9 ± 9,65 a	128,3 ± 18,9 a	140,9 ± 18,3 a
MSF	0,807 ± 0,12 a	0,838 ± 0,11 a	1,19 ± 0,19 a	1,27 ± 0,26 a
MSC	0,669 ± 0,11 a	0,722 ± 0,12 a	0,925 ± 0,11 a	0,813 ± 0,14 a
MSR	0,794 ± 0,09 a	0,792 ± 0,09 a	1,01 ± 0,12 a	1,06 ± 0,15 a
RPAR	3,52 ± 0,67 b	3,75 ± 0,86 b	5,01 ± 0,89 ab	6,34 ± 0,40 a

RAD	9,91 ± 0,87 a	11,0 ± 0,60 a	11,5 ± 0,76 a	12,3 ± 0,49 a
RPAR MS	1,97 ± 0,27 a	1,97 ± 1,25 a	2,04 ± 0,16 a	1,92 ± 0,08 a
AFE	53,4 ± 8,23 a	60,6 ± 5,81 a	52,4 ± 1,52 a	59,4 ± 3,53 a
MST	2,27 ± 0,27 a	2,35 ± 0,32 a	3,12 ± 0,41 a	3,15 ± 0,53 a
RAF	54,09 ± 5,75 a	46,1 ± 2,93 a	5,95 ± 1,98 a	42,2 ± 3,01 a
TAL	1,51 ± 0,172 ab	1,01 ± 0,13 b	1,64 ± 0,23 a	1,67 ± 0,29 a

4.2 MUDAS DE *E. BRASILIENSIS* RUSTIFICADAS PREVIAMENTE

Em mudas de *E. brasiliensis* previamente rustificadas, a medição ao meio-dia após a primeira aplicação apresentou que os CDs verde incrementaram o F_v/F_m em cerca de 8% em relação ao controle (FIG. 3A). Em contrapartida, não houve diferenças significativas entre os demais tratamentos nos parâmetros avaliados após a primeira aplicação, tanto pela manhã quanto ao meio-dia.

Após a segunda aplicação, ao analisar as folhas recém-expandidas no sol (FIG. 4B), observou-se que, ao meio-dia, o parâmetro F_0 apresentou-se cerca de 28% maior no controle e no tratamento com CD azul, em comparação aos demais tratamentos. No entanto, os demais parâmetros fisiológicos avaliados, tanto pela manhã quanto ao meio-dia, não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Em contrapartida, em mudas previamente rustificadas não foram encontradas diferenças significativas entre os tratamentos para os parâmetros de pigmentos analisados (TABELA 3).

Com relação aos dados biométricos das mudas rustificadas anteriormente, foram detectadas diferenças significativas apenas para o parâmetro CPA, em que a arbolina apresentou uma redução de 19% em relação ao controle (TABELA 4).

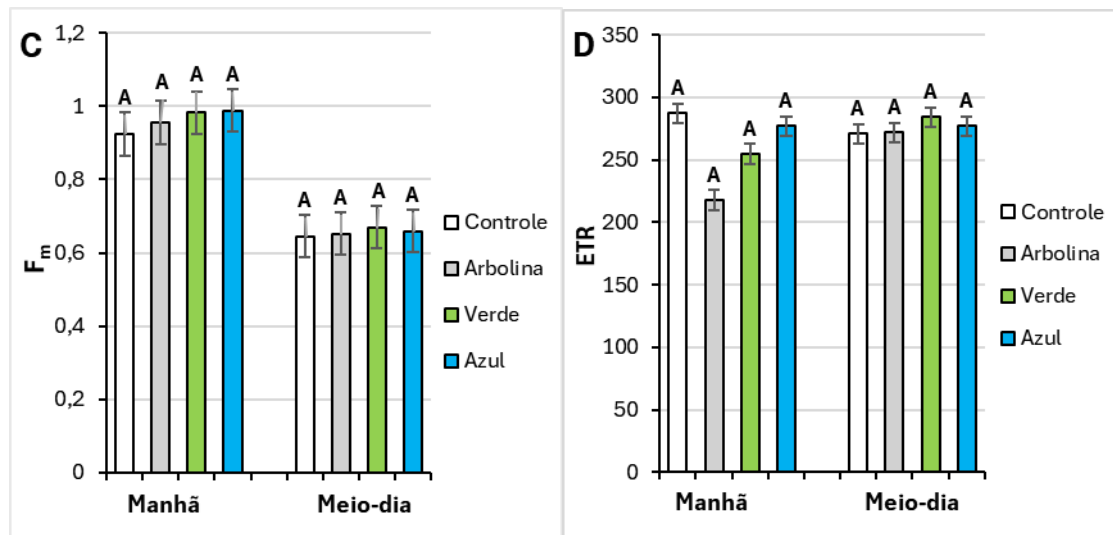
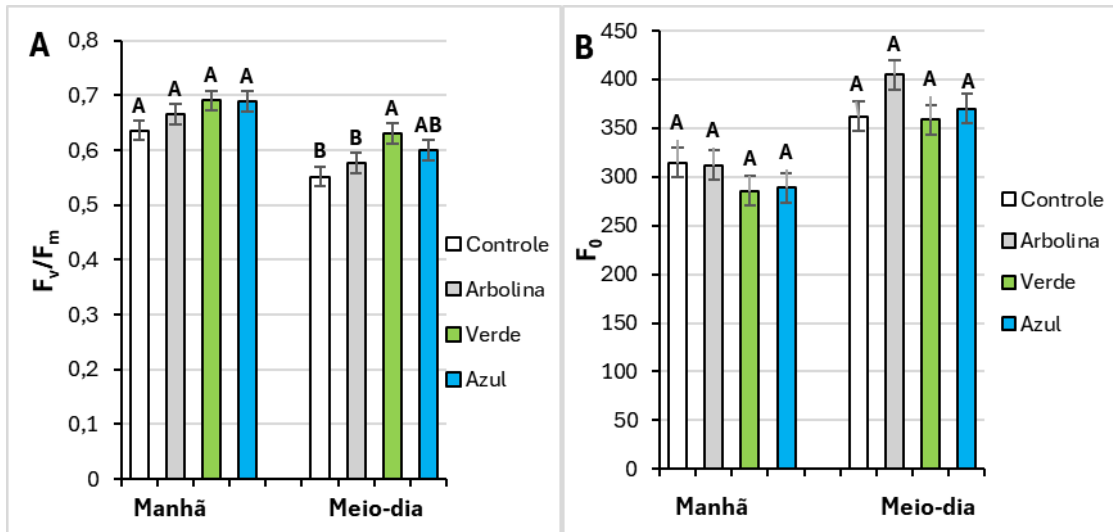
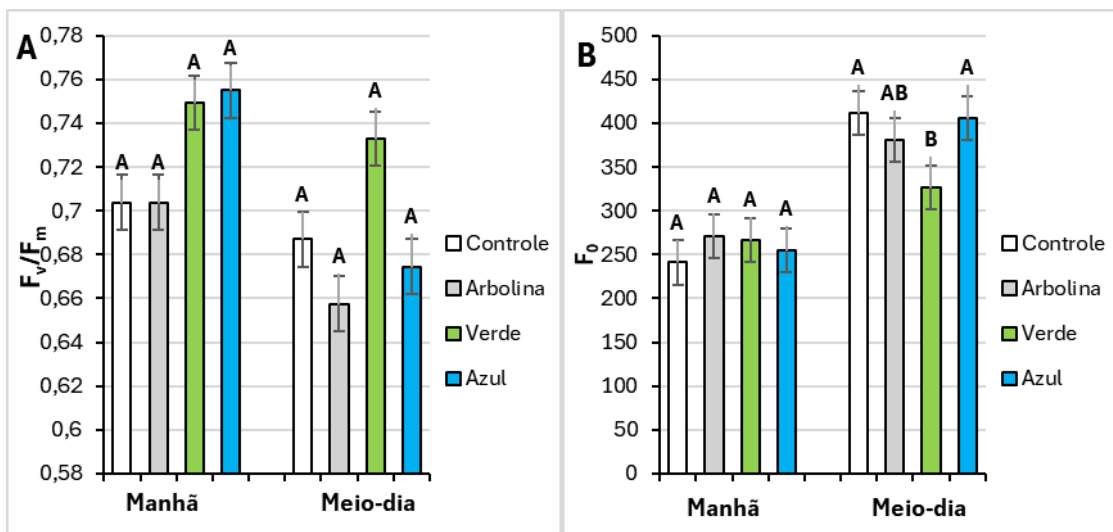


Figura 3 A) Eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m), B) fluorescência basal (F_0), C) fluorescência máxima (F_m), D) taxa relativa de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) em mudas de *Eugenia brasiliensis* rusticadas previamente, medidos após a primeira aplicação dos tratamentos, em dois momentos do dia (manhã e meio-dia). Colunas verdes representam CDs que emitem luz verde e colunas azuis representam CDs que emitem luz azul. Letras iguais indicam médias iguais de acordo com ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).



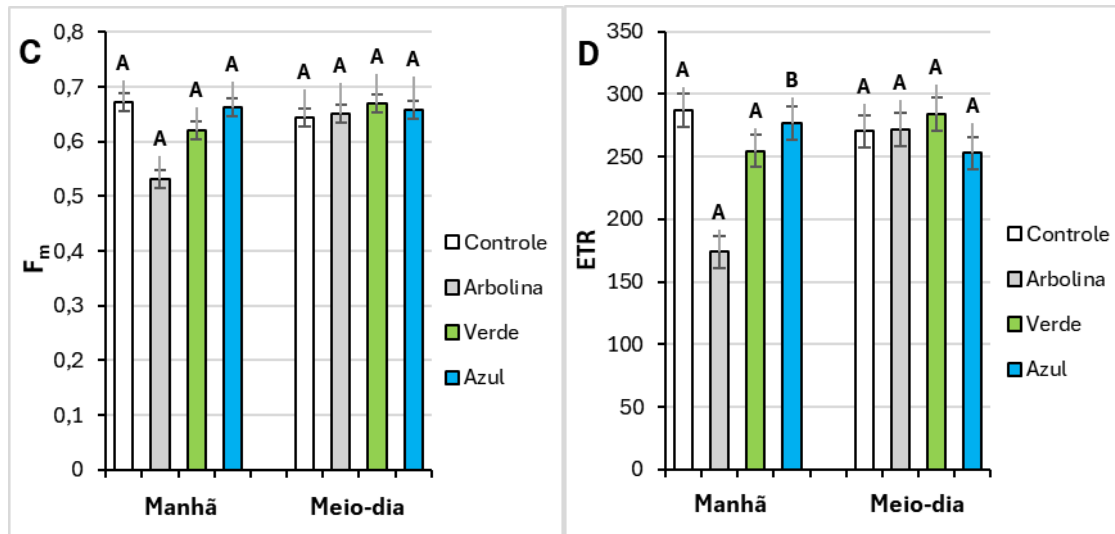


Figura 4 A) Eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m), B) fluorescência basal (F_0), C) fluorescência máxima (F_m), D) taxa relativa de transporte de elétrons no fotossistema II (ETR) em mudas de *Eugenia brasiliensis* rusticadas previamente, medidos após a primeira aplicação dos tratamentos, em dois momentos do dia (manhã e meio-dia). Colunas verdes representam CDs que emitem luz verde e colunas azuis representam CDs que emitem luz azul. Letras iguais indicam médias iguais de acordo com ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).

TABELA 3 Clorofila a (C_a), clorofila b (C_b), clorofila total (C_{total}), razão clorofila a/clorofila b (C_a/C_b), carotenoides totais (C_x+C), razão clorofila total/carotenoides totais (C_{total}/C_x+c) em mudas de *E. brasiliensis* rusticada previamente, Letras iguais não indicam diferenças significativas de acordo com ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).

Parâmetro	Controle	Arbolina	0,2 Verde	0,2 Azul
C_a	0,325 ± 0,03 a	0,324 ± 0,02 a	0,336 ± 0,03 a	0,302 ± 0,02 a
C_b	0,135 ± 0,01 a	0,133 ± 0,01 a	0,132 ± 0,009 a	0,122 ± 0,008 a
C_{total}	0,459 ± 0,04 a	0,457 ± 0,04 a	0,468 ± 0,04 a	0,424 ± 0,03 a
C_x+c	0,151 ± 0,01 a	0,157 ± 0,01 a	0,151 ± 0,006 a	0,156 ± 0,02 a
C_a/C_b	2,47 ± 0,14 a	2,44 ± 0,08 a	2,53 ± 0,07 a	2,46 ± 0,06 a
C_{total}/C_x+c	3,04 ± 0,22 a	2,93 ± 0,18 a	3,07 ± 0,16 a	2,78 ± 0,16 a

TABELA 4 Comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR) área foliar (AF), diâmetro do caule (DC), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca de folha (MSF) e massa seca total (MST), taxa assimilatória líquida (TAL), razão parte aérea raiz/massa seca (RPAR MS), razão parte aérea raiz/ diâmetro do caule (RPAR), relação parte aérea/diâmetro do caule (RAD), área foliar específica (AFE), razão de área foliar (RAF) de mudas de *Eugenia Brasiliensis* rusticadas anteriormente. Os dados foram expressos como média ± erro padrão ($n = 15$). Letras iguais na mesma coluna indicam médias iguais, com base em ANOVA seguida do teste de Fischer ($p < 0,05$).

Parâmetro	Controle	Arbolina	0,2 Verde	0,2 Azul
CPA	15,4 ± 0,77 a	15,4 ± 0,61 a	15,8 ± 0,66 a	15,4 ± 0,46 a
CR	12,6 ± 0,71 a	10,64 ± 0,35 b	11,5 ± 0,25 ab	11,6 ± 0,25 ab
DC	3,52 ± 0,21 a	3,73 ± 0,12 a	3,71 ± 0,11 a	3,80 ± 0,20 a
AF	116,0 ± 7,68 a	122,1 ± 10,0 a	116,5 ± 15,8 a	157,2 ± 25,4 a
MSF	1,03 ± 0,09 a	1,15 ± 0,09 a	0,98 ± 0,13 a	1,07 ± 0,08 a
MSC	0,67 ± 0,05 a	0,64 ± 0,04 a	0,65 ± 0,06 a	0,65 ± 0,06 a
MSR	0,76 ± 0,07 a	0,78 ± 0,05 a	0,69 ± 0,04 a	0,71 ± 0,05 a
RPAR	1,26 ± 0,09 a	1,45 ± 0,05 a	1,37 ± 0,06 a	1,32 ± 0,03 a

RAD	4,61 ± 0,42 a	4,18 ± 0,20 a	4,29 ± 0,19 a	4,14 ± 0,20 a
RPAR MS	2,30 ± 0,12 a	2,36 ± 0,16 a	2,33 ± 0,15 a	2,46 ± 0,15 a
AFE	51,9 ± 7,16 a	55,2 ± 10,0 a	54,3 ± 8,13 a	73,4 ± 15,5 a
MST	2,47 ± 0,18 a	2,58 ± 0,16 a	2,32 ± 0,21 a	2,44 ± 0,16 a
RAF	49,0 ± 4,55 a	48,5 ± 2,67 a	47,9 ± 3,17 a	65,4 ± 13,04 a
TAL	0,39 ± 0,10 a	0,30 ± 0,02 a	0,26 ± 0,04 a	0,31 ± 0,03 a

4.3 ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS (PCA)

Em relação à PCA feita com os dados de mudas não rustificadas previamente (FIG. 5), observou-se a separação do controle e da arbolina em relação aos tratamentos com CDs, que se relacionaram positivamente com parâmetros biométricos relacionados com a qualidade das mudas durante o processo de rustificação. Com relação aos parâmetros fisiológicos, destaca-se a correlação positiva do CD azul com os teores de pigmentos fotossintéticos, enquanto o CD verde está correlacionado a variáveis como a ETR (tarde) e F_0 em ambas as folhas avaliadas, no período da manhã e ao meio-dia

A PCA feita com dados de mudas previamente rustificadas também demonstrou uma separação entre os tratamentos (FIG. 6). No lado negativo da PC1, controle e arbolina estão correlacionados com parâmetros de biométricos e F_0 . Em contraste, para CD verde, observa-se a correlação positiva com F_v/F_m e ETR em ambas as folhas avaliadas, tanto pela manhã quanto ao meio-dia. Em contrapartida o tratamento com CD azul correlacionou-se com DC e RPAR MS.

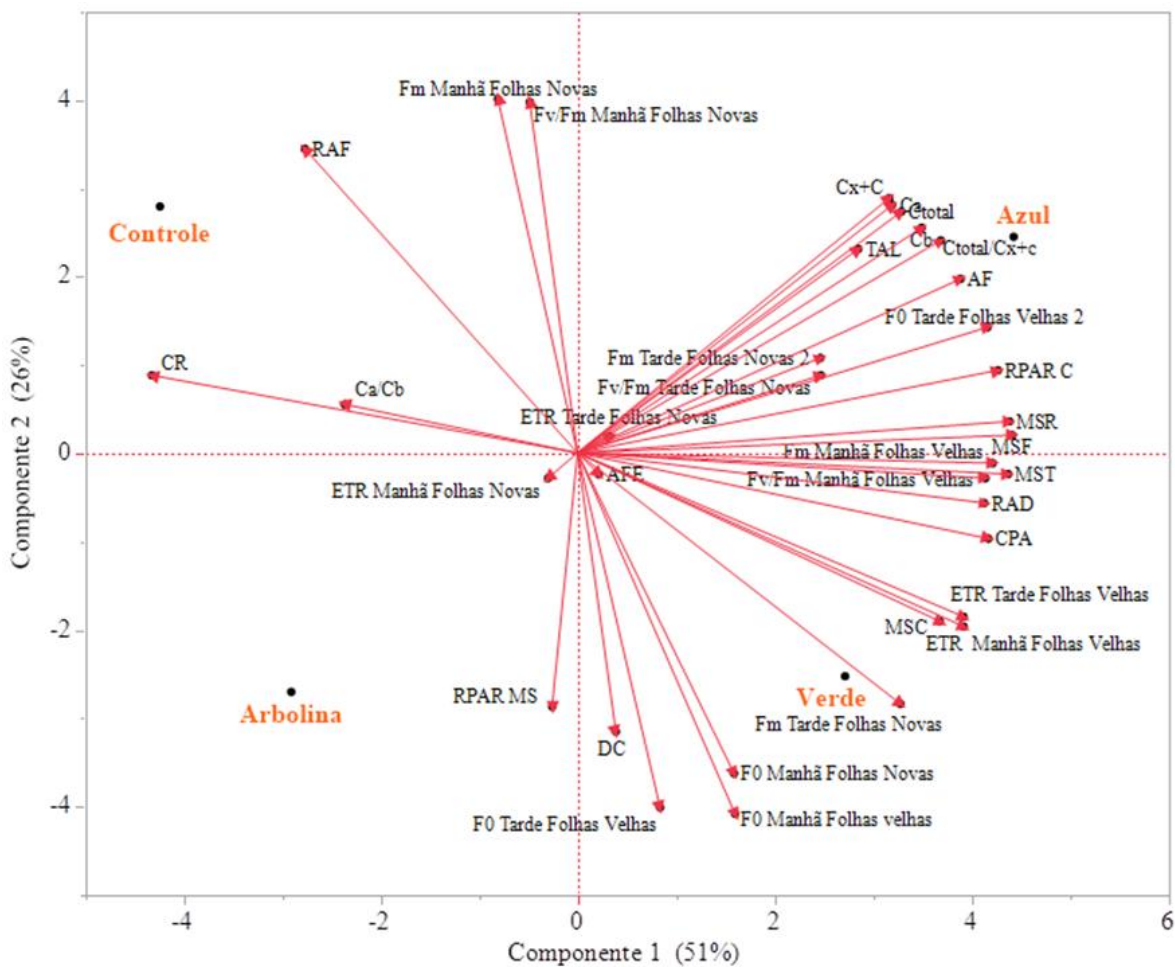


FIGURA 5 Análise de componentes principais dos parâmetros obtidos a partir de mudas de *Eugenia brasiliensis* Lam. não rustificadas previamente, transferidas para o sol pleno, após aplicação primeira e segunda aplicação dos pontos quânticos de carbono. Comprimento da parte aérea (CPA), comprimento da raiz (CR) área foliar (AF), diâmetro do caule (DC), massa seca da raiz (MSR), massa seca do caule (MSC), massa seca de folha (MSF) e massa seca total (MST), taxa assimilatória líquida (TAL), razão parte aérea raiz/massa seca (RPAR MS), razão parte aérea/raiz (RPAR), relação parte aérea/diâmetro do caule (RAD), área foliar específica (AFE), razão de área foliar (RAF), clorofila *a* (C_a), clorofila *b* (C_b), clorofila total (C_{total}), razão clorofila *a*/clorofila *b* (C_a/C_b), carotenoides totais (C_x+C), razão clorofila total/carotenoides totais (C_{total}/C_x+c), eficiência fotoquímica máxima (F_v/F_m), fluorescência máxima (F_m), taxa de transporte de elétrons (ETR) e fluorescência basal (F_0).

da razão F_v/F_m e da F_m , indicando uma melhora da atividade do fotossistema II. Esses CDs possuem capacidade de absorção da luz UV, convertendo-a em luz azul, que é fotossinteticamente ativa, podendo aumentar a taxa fotossintética (GUO et al., 2021; Li et al., 2021). De fato, os CDs podem transferir energia para os cloroplastos após serem excitados, acelerando o processo de transferência de elétrons e melhorando a eficiência fotossintética (ZHANG et al., 2018). Os efeitos do CD azul foram observados nas folhas expandidas na sombra, entretanto as folhas expandidas no sol desenvolveram mecanismos de fotoproteção independente dos CDs. Além disso, o CD na cor azul demonstrou o maior efeito nos pigmentos fotossintéticos, com aumentos significativos na clorofila *a*, clorofila *b* e clorofila total, indicam uma maior capacidade em utilizar a luz para a fotossíntese.

Esses efeitos na fisiologia das mudas resultaram no aumento nos parâmetros CPA e TAL, indicando que os CDs azul aumentaram a assimilação de CO₂ pelas mudas e aumentam significativamente a absorção de e melhoraram o desenvolvimento da parte aérea (KOU et al., 2021). Isso é ratificado pelo aumento da RPAR. Segundo Zhang (2018), os CDs atuam também como antioxidantes, protegendo as plantas dos danos causados pela radiação UV e promovendo o crescimento e o acúmulo de biomassa (MANSOUREH et al., 2025).

A menor eficácia CDs na cor verde em comparação com o azul na promoção da atividade fotossintética e no acúmulo de pigmentos observada em mudas não rustificadas previamente, está ligada a capacidade fotossintética, que é maximizada quando recebem luz nos picos de absorção da clorofila, como o azul (TAIZ et al., 2017). O benefício de converter UV em luz azul é direto, pois maximiza a absorção de energia no seu espectro mais eficiente, compensando a falta de mecanismos de proteção contra alta luminosidade, como o processo de aclimatação (ZHANG et al., 2018).

Resultados diferentes foram observados em mudas de *E. brasiliensis* previamente rustificadas. Nesse caso, CD verde manteve a eficiência máxima do PSII, com um incremento no F_v/F_m ao meio-dia. A menor utilização da luz verde representa uma via de dissipação de energia. Este mecanismo reduz a necessidade de ativar outros mecanismos mais complexos de *quenching* não fotoquímico (NPQ) (KELLY e RUNKLE et al., 2024)

Da mesma forma, os resultados nas folhas que se expandiram sob condições de sol pleno indicam F_0 mais baixo no tratamento com CDs verde. Isso sugere que as plantas tratadas com esse material apresentaram maior integridade do aparato fotossintético (FSII) nas folhas recém-expandidas ao sol (ANDLEEB et al., 2021). O F_0 mais elevado no controle e no tratamento CDs azul indica que as folhas recém-expandidas foram mais suscetíveis a danos foto oxidativos e alterações estruturais no FSII induzidas pela alta irradiação ao meio-dia. (MOUSTAKAS et al., 2022). Portanto, a melhoria no desempenho proporcionada pelo CD verde nas mudas que haviam previamente sido submetidas ao processo de rustificação indicam a necessidade de estudos mais aprofundados sobre a interação entre o estágio de aclimação em viveiros e a resposta ao espectro verde.

Quanto ao conteúdo de pigmentos fotossintéticos, as mudas previamente rustificadas não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos. Isso indica que elas já permaneciam aclimatadas à condição de sol pleno, mesmo tendo sido retornadas ao setor de crescimento do viveiro sob sombreamento parcial. É provável que as mudas já tenham aumentado a produção de compostos que atuam como protetores celulares, como antioxidantes. Quando o novo tratamento de estresse é aplicado, o nível desses compostos pode já estar próximo do máximo de tolerância da espécie, não demandando novas alterações bioquímicas (ROCHA, 2022). Da

mesma forma, não houve efeitos significativos dos CDs nos parâmetros biométricos dessas mudas, ratificando a efetividade da aplicação de um estresse controlado durante a fase de rustificação prévia (GROSSNICKLE, 2012).

Portanto, enquanto as mudas não rustificadas se beneficiaram da aplicação de CD azul, aumentando sua eficiência fotossintética e crescimento, as mudas já rustificadas mostraram uma capacidade adaptativa prévia que permitiu a manutenção da eficiência do fotossistema II sob condições de estresse. Essa comparação destaca a importância dos pontos quânticos de carbono e da rustificação na melhoria da qualidade morfofisiológica das mudas, contribuindo para práticas de reflorestamento e recuperação de ecossistemas degradados.

6 CONCLUSÕES

A aplicação de Pontos Quânticos de Carbono (CDs) demonstrou aprimorar a aclimação das mudas de *Eugenia brasiliensis*, tanto nas que não haviam sido rustificadas quanto nas já aclimatadas ao sol pleno. As mudas tratadas com CDs apresentaram melhorias na eficiência fotossintética e no desenvolvimento morfofisiológico, evidenciando resistência a estresses, como alta luminosidade. Consequentemente, o impacto dos CDs depende do comprimento de onda da luz que eles emitem, observa-se que a emissão de luz no espectro azul é significativamente mais vantajosa do que a emissão de luz verde. Portanto, os CDs contribuem para melhora da qualidade das mudas durante o processo de aclimação, destacando o potencial desses nanomateriais como uma estratégia para aumentar a sobrevivência e o desenvolvimento de espécies arbóreas nativas em projetos de restauração florestal.

REFERÊNCIAS

- ADIR, N.; ZER, H.; SHOCHAT, S.; OHAD, I. **Photoinhibition – a historical perspective**. *Photosynthesis Research*, v. 76, p. 343-370, 2003.
- FORTUNA, A. **Nanomateriais à base de carbono sintetizados a partir de resíduos da suinocultura: efeitos da aplicação foliar no desenvolvimento inicial de plantas de milho e soja**. 2023. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Agrônômica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2024.
- ALBERTO, S.; ARAÚJO, C.; BORGES DEMINICIS, B. **Fotoinibição da Fotossíntese**. v. 7, n. 4, p. out./dez. 2009.
- ANDLEEB, N.; ZAFAR, S.; RAHIM, Z.; IQBAL, M.; LAL, R.; FAROOQ, M. **A. Carbon quantum dots as versatile nanomaterials for improving soil health and plant stress tolerance: a comprehensive review**. *Planta*, v. 262, p. 1-31, 2025. DOI: 10.1007/s00425-025-04758-2.
- ANDERSON, J. M. **Shade-sun responses: compromises between acclimation and photoinhibition**. *Photoinhibition*, p. 1-38, 1987.
- ANISHEVSKI, L.; SANTAMARIA, C.; GIDDA, S. B.; COOPER, D. H.; BRACALION, P. H. S. **Ecosystem restoration, protected areas, and biodiversity conservation**. *Unasylla*, v. 66, n. 245, p. 19-27, mar. 2015.
- ARYAMOL, K. S. et al. **Recent advances of carbon pathways for sustainable environment development**. *Environmental Research*, v. 250, art. 118513, jun. 2024. DOI: 10.1016/j.envres.2024.118513.
- CALZAVARA, A. K.; BIANCHINI, E.; MAZZANATTI, T.; OLIVEIRA, H. C.; STOLF-MOREIRA, R.; PIMENTA, J. A. **Morphoanatomy and ecophysiology of tree seedlings in semideciduous forest during high-light acclimation in the nursery**. *Photosynthetica*, v. 53, p. 597–608, 2015.
- CALZAVARA, A. K.; ROCHA, J. S.; LOURENÇO, G.; SANADA, K.; MEDRI, C.; BIANCHINI, E.; PIMENTA, J. A.; STOLF-MOREIRA, R.; OLIVEIRA, H. C. **Acclimation responses to high light by *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae) leaves at different stages of development**. *Plant Biology (Stuttgart)*, v. 19, n. 5, p. 720-727, set. 2017. DOI: 10.1111/plb.12592.
- CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília, DF: Embrapa, 2007. 141 p.
- CHAZDON, R. L. **Beyond deforestation: restoring forests and ecosystem services on degraded lands**. *Science*, v. 320, n. 5882, p. 1458-1460, 2008.
- CORREIA, J. W. **Relação biodiversidade-productividade na Mata Atlântica**. São Cristóvão, 2024. Monografia (graduação em Ecologia) – Departamento de Ecologia, Centro de Ciências Biológicas e da Saúde, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, 2024.

DEBIASI, V. T.; ORNELAS, A. C. S.; BRAUCO, D. N.; CALZAVARA, A. K.; MEDRI, C.; BIANCHINI, E.; OLIVEIRA, H. C.; PIMENTA, J. A.; STOLF-MOREIRA, R.; BLAGITZ, M. **Irradiance triggers different morphophysiological responses in two neotropical tree seedlings with contrasting light demands.** *Theoretical and Experimental Plant Physiology*, v. 36, p. 33–50, 2024. DOI: [10.1007/s40626-023-00303-2](https://doi.org/10.1007/s40626-023-00303-2).

DEMMIG-ADAMS, B.; ADAMS, W. W. III. **Photoprotection and other responses of plants to high light stress.** *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, v. 43, p. 599–626, 1992.

DIAS, D. P.; MARENCO, R. A. Fotossíntese e fotoinibição em mogno e acariquara em função da luminosidade e temperatura foliar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 42, p. 305-311, 2007.

DIETZ, K. J. **Efficient high light acclimation involves rapid processes at multiple mechanistic levels.** *Journal of Experimental Botany*, v. 66, 2015.

DONATO, A. MORRETES, B. (2007). **Foliar anatomy of *Eugenia brasiliensis* Lam. (Myrtaceae) from restinga and forest areas.** *Revista Brasileira de Farmacognosia*. 17. 426-443. DOI: [10.1590/S0102-695X2007000300018](https://doi.org/10.1590/S0102-695X2007000300018).

FERREIRA, I.; DA ROCHA BRAGION, G.; FERREIRA, J.; BENEDITO, E.; DO COUTO, E. **Landscape pattern changes over 25 years across a hotspot zone in southern Brazil.** *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, v. 81, 2019. DOI: [10.2989/20702620.2018.1542563](https://doi.org/10.2989/20702620.2018.1542563).

GROSSNICKLE, S. C. **Why seedlings survive: influence of plant attributes.** *New Forests*, v. 43, p. 711–738, 2012. DOI: [10.1007/s11056-012-9336-6](https://doi.org/10.1007/s11056-012-9336-6).

GUIRGUIS, A.; YANG, W.; CONLAN, X.; KONG, L.; CAHILL, D.; WANG, Y. **Boosting plant photosynthesis with carbon dots: a critical review of performance and prospects.** *Small*, v. 19, art. e2300671, 2023. DOI: [10.1002/smll.202300671](https://doi.org/10.1002/smll.202300671).

JIANG, C. D.; WANG, X.; GAO, H. Y.; SHI, L.; CHOW, W. S. **Systemic regulation of leaf anatomical structure, photosynthetic performance, and high-light tolerance in sorghum.** *Plant Physiology*, v. 155, p. 1416–1424, 2011.

KELLER, L.; LELES, P. S. S.; OLIVEIRA NETO, S. N.; COUTINHO, R. P.; NASCIMENTO, D. F. **Sistema de blocos prensados para produção de mudas de três espécies arbóreas nativas.** *Rev. Árvore*, v. 33, p. 305-314, 2009.

KOU, E.; YAO, Y.; YANG, X.; SONG, S.; LI, W.; KANG, Y.; QU, S.; DONG, R.; PAN, X.; LI, D.; ZHANG, H.; LEI, B. **Regulation mechanisms of carbon dots in the development of lettuce and tomato.** *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, v. 9, p. 944-953, 2021. DOI: [10.1021/acssuschemeng.0c08308](https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.0c08308).

KUMARI, N.; RAJA, K. **Potential application of carbon dots for sustainable agriculture: current challenges and future prospects.** Journal of Fluorescence, p. 1-21, 2025. [DOI: 10.1007/s10895-025-04508-3](https://doi.org/10.1007/s10895-025-04508-3).

LAZARINI, J. G.; SARDI, J. C. O.; FRANCHIN, M.; NANI, B. D.; FREIRES, I. A.; INFANTE, J.; PASCHOAL, J. A. R.; ALENCAR, S. M. de; ROSALEN, P. L. **Bioprospection of *Eugenia brasiliensis*, a Brazilian native fruit, as a source of anti-inflammatory and antibiofilm compounds.** Biomedicine & Pharmacotherapy, Amsterdam, v. 102, p. 132-139, 2018. DOI: 10.1016/j.biopha.2018.03.034.

LIU, Y.; DAWSON, W.; PRATI, D.; HAEUSER, E.; FENG, Y.; VAN KLEUNEN, M. **Does greater specific leaf area plasticity help plants to maintain a high performance when shaded?** Annals of Botany, v. 118, mcw180, 2016. [DOI: 10.1093/aob/mcw180](https://doi.org/10.1093/aob/mcw180).

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil.** Nova Odessa, São Paulo: Editora Plantarum, v. 1, 1992.

KAWAZOE, M. M. **Aplicação de pontos quânticos de carbono para redução da fotoinibição e indução do crescimento em plantas de soja.** 2024. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Agrônômica) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2024.

KELLY, N. RUNKLE, E. (2024). **Dependence of far-red light on red and green light at increasing growth of lettuce.** PLOS ONE. 19. [10.1371/journal.pone.0313084](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0313084).

KUMARI, N.; RAJA, K. **Potential application of carbon dots for sustainable agriculture: current challenges and future prospects.** Journal of Fluorescence, p. 1–21, 2025. [DOI: 10.1007/s10895-025-04508-3](https://doi.org/10.1007/s10895-025-04508-3).

MAZZANATTI, T.; CALZAVARA, A. K.; PIMENTA, J. A.; OLIVEIRA, H. C.; STOLF-MOREIRA, R.; BIANCHINI, E. **Light acclimation in nursery: morphoanatomy and eco-physiology of seedlings of three light-demanding neotropical tree species.** Brazilian Journal of Botany, v. 39, p. 19–28, 2016.

MOUSTAKAS, M.; GUIDI, L.; CALATAYUD, A. **Editorial: chlorophyll fluorescence analysis in biotic and abiotic stress, volume II.** Frontiers in Plant Science, v. 13, art. 1066865, 2022. [DOI: 10.3389/fpls.2022.1066865](https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1066865).

NASCIMENTO, L. S. M. et al. **Characterization of bioactive compounds in *Eugenia brasiliensis*, Lam. (grumixama).** Nutrition and Food Technology: Open Access, v. 3, n. 3, p. 1-7, nov. 2017. [DOI: 10.16966/2470-6086.146](https://doi.org/10.16966/2470-6086.146).

NUNES, Y. R. F. et al. **Atividades fenológicas em *Guazuma ulmifolia* Lam. (Malvaceae) em uma floresta estacional decidual no norte de Minas Gerais.** Lundiana, v. 6, 2005.

OLIVEIRA, G. et al. **Eugenia brasiliensis: analysis of the chemical profile and evaluation of cytotoxic potential.** Chemistry & Biodiversity, v. 22, art. e202500429, 2025. DOI: [10.1002/cbdv.202500429](https://doi.org/10.1002/cbdv.202500429).

OLIVEIRA, A. P.; PEREIRA, S. R.; CÂNDIDO, A. C. S.; LAURA, V. A.; PERES, M. T. L. P. **Can allelopathic grasses limit seed germination and seedling growth of mutambo? A test with two species of Brachiaria grasses.** Planta Daninha, v. 34, p. 639–648, 2016.

OPOKU, H.; REN, J.; ZHOU, X.; ZHANG, P.; TANG, S.; DANG, D.; EDMAN, L.; WANG, J. **Efficient UV emission from carbon dots derived from a green-tea extract.** Nano Research, v. 18, p. 94907321-949073211, 2025. DOI: [10.26599/NR.2025.94907321](https://doi.org/10.26599/NR.2025.94907321).

RIIKONEN, J.; LUORANEN, J. **Seedling production and the field performance of seedlings.** Forests, v. 9, art. 740, 2018. DOI: [10.3390/f9120740](https://doi.org/10.3390/f9120740).

ROCHA, J. S.; CALZAVARA, A. K.; BIANCHINI, E.; PIMENTA, J. A.; STOLF-MOREIRA, R.; OLIVEIRA, H. C. **Nitrogen supplementation improves the high-light acclimation of Guazuma ulmifolia Lam. seedlings.** Trees, v. 33, p. 421-431, 2019.

SAFAR, N. V. H.; MAGNAGO, L. F. S.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Resilience of lowland Atlantic forests in a highly fragmented landscape: insights on the temporal scale of landscape restoration.** Forest Ecology and Management, v. 470, p. 1181-1183, 2020.

SCALON, S. P. Q.; MUSSURY, R. M.; KISSMANN, C. **Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de Mutambo (Guazuma ulmifolia Lam.).** Ciência Florestal, v. 21, n. 4, p. 655-662, 2011.

SERAFIM, A. C.C.; SIQUEIRA, A. de P. C.; CASTILHO, M.; SOARES, M. R. dos S.; FORTUNA, A. T. X.; TERZIOTTI, R. S.; THERÉZIO, E. M.; GOMES, D. G.; OLIVEIRA, H. C.; TEREZO, A. J.; SIQUEIRA, A. B. **Plant Growth Enhancement Using Carbon Dots Synthesized from Swine Effluent: A Sustainable Approach.** ACS Agricultural Science & Technology. 2025. <https://doi.org/10.1021/acscagscitech.5c00411>

SILVA, L. **Plasticidade e aclimação foliar à irradiância em espécies da Floresta Atlântica.** 2010. 109 f. Tese (Doutorado) - Curso de Programa de Pós-graduação em Botânica, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2010.

SIMS, D. A.; PEARCY, R. W. **Response of leaf anatomy and photosynthetic capacity in Alocasia macrorrhiza (Araceae) to a transfer from low to high light.** American Journal of Botany, v. 79, p. 449–455, 1992.

STEFANELLO, M. É.; PASCOAL, A. C.; SALVADOR, M. J. **Essential oils from neotropical Myrtaceae: chemical diversity and biological properties.** Chemistry & Biodiversity, v. 8, n. 1, p. 73–94, jan. 2011. DOI: [10.1002/cbdv.201000098](https://doi.org/10.1002/cbdv.201000098).

STURION, J. A.; ANTUNES, B. M. A. **Produção de mudas de espécies florestais.** In: GALVÃO, A. P. M. (Ed.). **Reflorestamento de propriedades rurais para fins produtivos e ambientais.** Colombo: Embrapa, 2000. p. 125-150.

SWIFT, T. A.; OLIVER, T. A. A.; GALAN, M. C.; WHITNEY, H. M. **Functional nanomaterials to augment photosynthesis: evidence and considerations for their responsible use in agricultural applications.** *Interface Focus*, v. 9, art. 201800048. DOI: [10.1098/rsfs.2018.0048](https://doi.org/10.1098/rsfs.2018.0048).

TAKAHASHI, S.; BADGER, M. R. **Photoprotection in plants: a new light on photosystem II damage.** *Trends in Plant Science*, v. 16, n. 1, p. 53-60, jan. 2011. DOI: [10.1016/j.tplants.2010.10.001](https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.001).

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia Vegetal.** 3. ed. Porto Alegre: Artmed, 2004. 719 p.

UENO, M.; SAE-TANG, P.; KUSAMA, Y.; HIHARA, Y.; MATSUDA, M.; HASUNUMA, T.; NISHIYAMA, Y. **Moderate heat stress stimulates repair of photosystem II during photoinhibition in *Synechocystis* sp. PCC 6803.** *Plant Cell Physiology*, v. 57, n. 11, p. 2417-2426, nov. 2016. DOI: [10.1093/pcp/pcw153](https://doi.org/10.1093/pcp/pcw153).

WANG, Y.; XIE, Z.; WANG, X. **Fluorescent carbon-dots enhance light harvesting and photosynthesis by overexpressing *PsbP* and *PsiK* genes.** *Journal of Nanobiotechnology*, v. 19, art. 260, 2021. DOI: [10.1186/s12951-021-01005-0](https://doi.org/10.1186/s12951-021-01005-0).

WENDLING, I.; DUTRA, L. F.; GROSSI, F. **Produção de mudas de espécies lenhosas.** Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 54 p. (Embrapa Florestas. Documentos, 130).

WILLIAMS, M. **Deforestation: past and present.** *Progress in Human Geography*, v. 13, n. 2, p. 176–208, 1989.

YAAKOBI, A.; LIVNE-LUZON, S.; MARQUES, F.; MARIANI, B.; STERN, R.; KLEIN, T. **Growth and drought resilience of four native tree species suitable for reforestation of Brazil's Atlantic Forest.** *Forestry: An International Journal of Forest Research*, v. 96, 2023. DOI: [10.1093/forestry/cpac059](https://doi.org/10.1093/forestry/cpac059).

YU, Y.; ZENG, Q.; TAO, S.; XIA, C.; LIU, C.; LIU, P.; YANG, B. **Carbon dots based photoinduced reactions: advances and perspective.** *Advanced Science*, v. 10, 2023. DOI: [10.1002/advs.202207621](https://doi.org/10.1002/advs.202207621).

ZIA, M. U.; THANJAVUR SAMBASIVAM, P.; CHEN, D.; BHUIYAN, S.; FORD, R.; LI, Q. **A carbon dot toolbox for managing biotic and abiotic stresses in crop production systems.** *EcoMat*, v. 6, p. 1–15, 2024. DOI: [10.1002/eom2.12451](https://doi.org/10.1002/eom2.12451).