



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO DE CIÊNCIAS HUMANAS E NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOLOGIA VEGETAL

FELIPE CASSA DUARTE VENANCIO

**ECOFISIOLOGIA DE DOIS ECOTIPOS DE *Paubrasilia echinata* EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DA MATA ATLÂNTICA, BRASIL**

VITÓRIA – ES
ABRIL, 2022

FELIPE CASSA DUARTE VENANCIO

**ECOFISIOLOGIA DE DOIS ECOTIPOS DE *Paubrasilia echinata* EM
CENÁRIOS DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS DA MATA ATLÂNTICA, BRASIL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutor em Biologia Vegetal na linha de pesquisa de Comportamento Ecofisiológico de Plantas.

Orientador: Prof. Dr. Geraldo Rogério Faustini
Cuzzuol

Coorientador: Prof. Dr. José Eduardo Macedo
Pezzopane

VITÓRIA – ES

ABRIL, 2022

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

V448e Venancio, Felipe Cassa Duarte, 1992-
Ecofisiologia de dois ecotipos de *Paubrasilia echinata* em cenários de mudanças climáticas da Mata Atlântica, Brasil / Felipe Cassa Duarte Venancio. - 2022.
97 f. : il.

Orientador: Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol. Coorientador: José Eduardo Macedo Pezzopane.
Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Humanas e Naturais.

1. Comportamento ecofisiológico de plantas. 2. Mudanças climáticas. 3. Arbóreas tropicais. 4. Crescimento e fotossíntese. 5. Indicadores de estresse. 6. Alocação de carboidratos. I. Cuzzuol, Geraldo Rogério Faustini. II. Pezzopane, José Eduardo Macedo. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de Ciências Humanas e Naturais. IV. Título.

CDU: 57

Felipe Cassa Duarte Venancio

Ecofisiologia de dois ecotipos de *Paubrasilia echinata* em cenários de mudanças climáticas da Mata Atlântica, Brasil

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal do Centro de Ciências Humanas e Naturais, da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Doutor em Biologia Vegetal.

Aprovada em 28 de abril de 2022.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol (UFES)
Orientador e Presidente da Comissão

Prof. Dr. Antelmo Ralph Falqueto (UFES)
Examinador Interno

Prof^a Dr^a Diolina Moura Silva (UFES)
Examinadora Interna

Dr. João Vitor Toledo (UFES)
Examinador Externo

Dr^a Adriana Grandis (USP)
Examinadora Externa



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo

Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
GERALDO ROGERIO FAUSTINI CUZZUOL - SIAPE 1173398
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal
Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Biologia
Vegetal - PPGCBV/CCHN Em 28/04/2022 às 14:57

Para verificar as assinaturas e visualizar o
documento original acesse o link:
[https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-
assinados/458411?tipoArquivo=O](https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/458411?tipoArquivo=O)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo

Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
DIOLINA MOURA SILVA - SIAPE 294671
Departamento de Ciências
Biológicas - DCB/CCHN Em
29/04/2022 às 10:00

Para verificar as assinaturas e visualizar o
documento original acesse o link:
[https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-
assinados/459361?tipoArquivo=O](https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/459361?tipoArquivo=O)



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

PROTOCOLO DE ASSINATURA



O documento acima foi assinado digitalmente com senha eletrônica através do Protocolo

Web, conforme Portaria UFES nº 1.269 de 30/08/2018, por
ANTELMO RALPH FALQUETO - SIAPE 1648734
Departamento de Ciências Agrárias e
Biológicas - DCAB/CEUNES Em 03/05/2022
às 11:39

Para verificar as assinaturas e visualizar o
documento original acesse o link:
[https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-
assinados/462085?tipoArquivo=O](https://api.lepisma.ufes.br/arquivos-assinados/462085?tipoArquivo=O)

Documento original assinado eletronicamente, conforme MP 2200-2/2001, art. 10, § 2º, por:

JOÃO VÍTOR TOLEDO

CIDADÃO

assinado em 03/05/2022 13:23:34 -03:00



INFORMAÇÕES DO DOCUMENTO

Documento capturado em 03/05/2022 13:23:35 (HORÁRIO DE BRASÍLIA - UTC-3) por JOÃO VÍTOR TOLEDO (CIDADÃO)

Valor Legal: ORIGINAL | Natureza: DOCUMENTO NATO-DIGITAL

DEDICATÓRIA

A Deus pelo dom da vida e pela sabedoria;

A meus pais, meu irmão, minha namorada, avós, tios e primos por depositar toda força, suporte, apoio e principalmente amor!

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós-Graduação em Biologia Vegetal da Universidade Federal do Espírito Santo (PPGBV/UFES) pela oportunidade de desenvolver essa pesquisa e à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo - FAPES pela concessão da bolsa de estudo.

Ao Laboratório de Fisiologia e Bioquímica de Plantas, Departamento de Ciências Biológicas/UFES e Laboratório de Meteorologia e Ecofisiologia Florestal, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira/UFES pelo suporte, infraestrutura e facilidade para a realização de todas as análises.

Agradeço a meu orientador e professor Dr. Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol, pela orientação e aprendizado, e por abrir as portas para novas oportunidades durante a minha formação e a meu coorientador, Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane, pelo ensinamento e contribuições.

Aos amigos e colegas de laboratório Débora, Carlos, Maria Cecília, Breno, Jehová, Matheus, João Vitor, Genilda, Luciana, Carol, Elbya, Roberto, Breno, Meggie, Talita, Bernardo, Fabiano e Leonardo, por todo suporte e conhecimento e todos os envolvidos nessa pesquisa.

Aos colegas de curso da turma de 2018/1 pela convivência e aprendizado.

Por toda atenção e conhecimento transmitido pelos professores durante a graduação, mestrado e doutorado.

Deixo o reconhecimento e meus sinceros agradecimentos a todos os envolvidos nessa jornada científica, muito obrigado!

Não fui eu que lhe ordenei? Seja forte e corajoso!
Não se apavore, nem se desanime, pois o Senhor, o
seu Deus, estará com você por onde você andar.

(Josué 1:6-9)

RESUMO

VENANCIO, Felipe Cassa Duarte. **Ecofisiologia de dois ecotipos de *Paubrasilia echinata* em cenários de mudanças climáticas da Mata Atlântica, Brasil.** 2022. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, ES. Orientador: Dr. Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol. Coorientador: Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane.

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) introduziu alguns cenários chamados de Vias de Concentração Representativas (RCP) em função dos aumentos na $[CO_2]$. Dentre as projeções previstas para Mata Atlântica, Brasil, foram selecionados dois cenários climáticos: um otimista (RCP 4.5) composto por um aumento moderado na $[CO_2]$, temperatura e demanda evaporativa e outro pessimista (RCP 8.5) composto por um aumento alto na $[CO_2]$, temperatura e demanda evaporativa, representando condições climáticas mais extremas. As respostas ecofisiológicas de espécies arbóreas tropicais em cenários climáticos extremos são pouco conhecidas e nesse panorama surge uma questão: como as arbóreas tropicais tolerantes à sombra e ao sol responderão às mudanças climáticas? O *Paubrasilia echinata* (pau-brasil) é uma espécie nativa da Mata Atlântica e apresenta três ecotipos (folha pequena, média e grande), divergentes quanto ao hábito ecológico na fase inicial do crescimento. A utilização de uma espécie com variações intraespecíficas e ecofisiológicas como o *P. echinata* é bastante interessante por eliminar a divergência interespecífica. Mudanças dos ecotipos folha pequena (tolerante a sombra) e folha média (tolerante ao sol) foram cultivadas por 90 dias em OTC's no interior de casas de vegetação climatizadas, em três cenários climáticos: um simulando as condições climáticas atuais da Mata Atlântica ($T= 26.1^{\circ}C$, UR= 82% e $[CO_2]= 400$ ppm) e dois cenários de mudanças climáticas-RCP 4.5 ($T= 28.1^{\circ}C$, UR= 80% e $[CO_2]= 580$ ppm) e RCP 8.5 ($T= 29.6^{\circ}C$, UR= 74% e $[CO_2]= 936$ ppm). Para cada cenário, foram aplicados dois níveis de umidade do substrato: 80% (bem irrigado) e 40% (restrição hídrica). Ao final do experimento foram avaliadas as seguintes variáveis: crescimento, trocas gasosas, status hídrico, fluorescência da clorofila *a*, carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular. O aumento da $[CO_2]$ teve resposta positiva no crescimento das plantas dos dois ecotipos. Plantas bem irrigadas apresentaram maior altura do caule, massa seca total, assimilação líquida de CO_2 e carbono intracelular. Além disso, mesmo com restrição hídrica, as plantas cultivadas nos cenários com aumento da $[CO_2]$, apresentaram maior crescimento, assimilação de CO_2 , menor condutância estomática e transpiração. Essas respostas resultaram no aumento da eficiência do uso da água e eficiência de carboxilação. A elevada $[CO_2]$ provavelmente tem um “efeito tampão” nas plantas dos dois ecotipos, aumentando a fotossíntese e o crescimento inicial, refletindo maior mobilização e acúmulo de carboidratos nos órgãos vegetativos. A disponibilidade hídrica apresentou maior influência nos teores de polímeros de parede celular, em relação aos cenários. Esses mecanismos utilizados pelas plantas cultivadas em elevado CO_2 , podem ter favorecido a realização de ajuste osmótico nessas condições, principalmente quando cultivadas com restrição hídrica. O efeito do cenário RCP 8.5 não foi limitante para os dois ecotipos. Neste cenário, foram observadas plantas dos dois ecotipos com maior produção de massa seca total, indicando que as mudanças climáticas previstas não promoverão tanta limitação sobre o futuro do *P. echinata*.

Palavras-chave: Crescimento. CO_2 . Fotossíntese. Carboidratos. Pau-brasil. Temperatura.

ABSTRACT

VENÂNCIO, Felipe Cassa Duarte. **Ecophysiology of two ecotypes of *Paubrasilia echinata* in climate change scenarios of Atlantic forest, Brazil.** 2022. Thesis (Doctorate in Plant Biology) – Federal University of Espírito Santo, Vitória, ES. Advisor: Dr. Geraldo Rogério Faustini Cuzzuol. Co-advisor: Dr. José Eduardo Macedo Pezzopane.

The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) has introduced some scenarios called Representative Concentration Pathways (RCP) due to increases in [CO₂]. Among the forecasts for the Atlantic Forest, Brazil, two climate scenarios were selected: an optimistic one (RCP 4.5) composed of a moderate increase in [CO₂], temperature and evaporative demand and another pessimistic (RCP 8.5) composed of a high increase in [CO₂], temperature and evaporative demand, representing more extreme weather conditions. The ecophysiological responses of tropical tree species in extreme climate scenarios are poorly understood, and in this panorama, a question arises: how will shade-tolerant and sun-tolerant tropical trees respond to climate change? *Paubrasilia echinata* (brazilwood) is a species native to the Atlantic forest and has three ecotypes (small, medium and large leaf), which differ in terms of ecological habit in the initial phase of growth. The use of a species with intraspecific and ecophysiological variations such as *P. echinata* is quite interesting because it eliminates interspecific divergence. Seedlings of the small leaf (shade-tolerant) and medium leaf (sun-tolerant) ecotypes were cultivated for 90 days in OTC's inside climatized greenhouses, in three climate scenarios: one simulating the current climatic conditions of the Atlantic Forest (T= 26.1°C, RH= 82% and [CO₂]= 400 ppm) and two climate change scenarios-RCP 4.5 (T= 28.1°C, RH= 80% and [CO₂] = 580 ppm) and RCP 8.5 (T= 29.6°C, RH= 74% and [CO₂]= 936 ppm). For each scenario, two levels of substrate moisture were applied: 80% (well irrigated) and 40% (water restriction). At the end of the experiment, the following variables were evaluated: growth, gas exchange, water status, chlorophyll a fluorescence, non structural carbohydrates and cell wall polymers. The increase in [CO₂] had a positive response in the growth of plants of the two ecotypes. Well irrigated plants showed higher stem height, total dry mass, net assimilation of CO₂ and intracellular carbon. Furthermore, even with water restriction, plants grown in scenarios with increased [CO₂] showed higher growth, CO₂ assimilation, lower stomatal conductance and transpiration. These responses resulted in increased water use efficiency and carboxylation efficiency. Elevated [CO₂] probably has a “buffering effect” on plants of the two ecotypes, increasing photosynthesis and early growth, reflecting greater mobilization and accumulation of carbohydrates in vegetative organs. Water availability had a greater influence on the contents of cell wall polymers, in relation to the scenarios. These mechanisms used by plants grown in high CO₂ may have favored osmotic adjustment under these conditions, especially when grown with water restriction. The effect of the RCP 8.5 scenario was not limiting for the two ecotypes. In this scenario, plants of the two ecotypes with higher production of total dry mass were observed, indicating that the predicted climate changes will not promote so much limitation on the future of *P. echinata*.

Keywords: Brazilwood. Carbohydrates. CO₂, Growth. Photosynthesis. Temperature.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Morfologia de mudas de um ano de idade dos ecotipos folha pequena (a) e folha média (b) de *Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, HCLima e GPLewis antes do início do experimento

Figura 2. Estrutura das casas de vegetação localizadas no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES: (A) área externa, (B) câmaras de topo aberto, (C) painel de controle, (D) pad cooling, (E) ventiladores e aquecedores e (F) sistema de pressão de CO₂ (cilindro 25 kg)

Figura 3. Curso diário da temperatura do ar, T_{ar} (°C), déficit de pressão de vapor, DPV (Kpa), radiação fotossinteticamente ativa, PAR ($\text{mol.m}^{-2}.\text{seg}^{-1}$) e concentração atmosférica de CO₂, [CO₂] (ppm) nos cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) durante 90 dias de experimento

Figura 4. Crescimento de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade máxima de retenção de água). Barra de escala em centímetros (cm)

Figura 5. Medidas de crescimento em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 6. Trocas gasosas em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4,5 e 8,5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 7. Análise dos componentes principais de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição nos tratamentos: FAA (40%), FAA(80%), RCP 8,5(40%). RCP 4,5 (80%), RCP 8,5 (40%) e RCP 8,5 (80%). A, B Mapa fatorial de indivíduos e C, D Mapa fatorial de variáveis. SH = altura do caule, NL = número de folíolos, TDM = massa seca total, TLA = área foliar total, RGR = taxa de crescimento relativa, NAR = taxa de assimilação líquida, A = taxa de assimilação líquida de CO₂, gs = condutância estomática, E = taxa de transpiração, Ci = concentração de carbono intracelular, A/Ci = eficiência de carboxilação, WUE = eficiência de uso da água

Figura 8. Indicadores de estresse hídrico em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 9. Parâmetros de fluorescência transitória em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 10. Análise de componentes principais de variáveis ecofisiológicas em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* dos respectivos tratamentos: A) FAA (80%), B) FAA (40%), C) RCP 4.5 (80%), D) RCP 4.5 (40%), E) RCP 8.5 (80%) e F) RCP 8.5 (40%). A, B) Mapa fatorial das variáveis e C, D) mapa fatorial dos indivíduos. Em que: LDM = leaf dry mass, SDM = stem dry mass, RDM = root dry mass, LWP = leaf water potential, CWSIa = crop water stress index 10 am, CWSIb = crop water stress index 12

pm, CWSIc = crop water stress index 15 pm, FV.FM = rendimento quântico e PIABS = índice de desempenho potencial do PSII

Figura 11. Polímeros de parede celular: celulose, hemicelulose e lignina (mg.g^{-1}) do caule em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 12. Carboidratos solúveis totais (mg.g^{-1}) em folhas, caules e raízes de plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade no substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 13. Amido, glicose, sacarose e frutose (mg.g^{-1}) em folhas, caules e raízes de plantas de dois ecotipos de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade no substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Figura 14. Análise de componentes principais de variáveis ecofisiológicas em plantas de dois ecotipos de *P. echinata* dos respectivos tratamentos: A) FAA (80%), B) FAA (40%), C) RCP 4.5 (80%), D) RCP 4.5 (40%), E) RCP 8.5 (80%) e F) RCP 8.5 (40%). A. B) Mapa fatorial das variáveis e dos indivíduos do ecotipo folha pequena. C.D) Mapa fatorial das variáveis e dos indivíduos do ecotipo folha média. Em que:

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Caracterização dos cenários climáticos: floresta Atlântica atual (FAA), RCP 4.5 e 8.5

Tabela 2. Caracterização microclimática dos cenários climáticos simulado em casas de vegetação com controle de temperatura e umidade relativa durante o experimento

Tabela 3. Parâmetros dos transientes da fluorescência da clorofila calculados pelo teste-JIP

Tabela 4. Crescimento em plantas do ecotipo folha pequena de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Tabela 5. Crescimento em plantas do ecotipo folha média de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80% e 40% da capacidade de retenção de água)

Tabela S1. Análise de variância do ecotipo folha pequena de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos tratamentos

Tabela S2. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha média de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos tratamentos

Tabela S3. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha pequena de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos tratamentos

Tabela S4. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha média de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos tratamentos

Tabela S5. Análise de variância dos carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular do ecotipo folha pequena de *P. echinata* aos 90 dias

Tabela S6. Análise de variância dos carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular do ecotipo folha pequena de *P. echinata* aos 90 dias

LISTA DE ABREVIACOES

[CO₂] = concentração atmosférica de dióxido de carbono

T = temperatura do ar

UR = umidade relativa do ar

DPV = déficit de pressão de vapor

IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change

RCP = Representative Concentration Pathways

FAA = floresta Atlântica atual

CNE = carboidratos não estruturais

OTC = open top chamber

PPC = polímeros de parede celular

RuBisCO = ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase/oxinase

KPa = Quilo Pascal

MPa = Mega Pascal

rpm = rotações por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	20
2. HIPÓTESES.....	21
3. OBJETIVO GERAL	22
3.1. Objetivos específicos.....	22
4. REVISÃO DE LITERATURA	23
4.1. <i>Paubrasilia echinata</i> Lam.	23
4.2. Efeitos do CO ₂ na ecofisiologia de plantas	25
4.3. Efeitos da temperatura do ar na ecofisiologia de plantas	26
4.4. Efeitos da disponibilidade hídrica na ecofisiologia de plantas.....	27
4.5. Efeitos do déficit de pressão de vapor na ecofisiologia de plantas	28
4.6. Estrutura dos carboidratos não estruturais e suas relações com o ambiente	29
4.7. Estrutura dos polímeros de parede celular e suas relações com o ambiente	31
5. REFERÊNCIAS	32
6. MATERIAL E MÉTODOS	40
6.1. Local do estudo	40
6.2. Material vegetal.....	40
6.3. Simulação dos cenários climáticos.....	41
6.4. Medidas de crescimento	46
6.5. Trocas gasosas.....	46
6.6. Potencial hídrico foliar	47
6.7. Crop water stress index	47
6.8. Fluorescência transiente da clorofila <i>a</i>	48
6.9. Carboidratos	49
6.9.1. Preparo das amostras para análises de carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular	49
6.9.2. Carboidratos não estruturais (açúcares solúveis e amido).....	49
6.9.3. Amido.....	49
6.10. Polímeros de parede celular	50
6.10.1. Lignina	50
6.10.2. Celulose.....	51
6.10.3. Hemicelulose.....	52
6.11. Análises estatísticas.....	53
7. RESULTADOS.....	53

7.1.	Crescimento.....	53
7.2.	Trocas gasosas.....	59
7.3.	Análise de componentes principais das variáveis de crescimento e trocas gasosas.....	61
7.4.	Potencial hídrico foliar (Ψ_w).....	62
7.5.	Crop water stress index (CWSI).....	63
7.6.	Fluorescência da clorofila <i>a</i>	65
7.7.	Análise de componentes principais	67
7.8.	Polímeros de parede celular	68
7.9.	Carboidratos não estruturais.....	70
7.10.	Análise de componentes principais	74
8.	DISCUSSÃO.....	76
8.1.	Crescimento.....	76
8.2.	Trocas gasosas.....	76
8.3.	Potencial hídrico foliar, crop water stress index e fluorescência transiente da clorofila <i>a</i>	78
8.4.	Carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular	79
9.	CONCLUSÕES.....	81
10.	MATERIAL SUPLEMENTAR.....	82
11.	REFERÊNCIAS	90

1. INTRODUÇÃO

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (Intergovernmental Panel of Climate Change-IPCC, 2013) introduziu alguns cenários possíveis de intervalos de forçamento radiativo compreendendo alterações na concentração atmosférica de dióxido de carbono ($[CO_2]$), temperatura e demanda evaporativa, chamados de Vias de Concentração Representativas (Representative Concentration Pathways-RCP). O forçamento radiativo é o calor extra que a atmosfera reterá como resultado da emissão de gases do efeito estufa, medido em Watts por m^2 (JUBB et al., 2016). A complexidade das futuras emissões de gases foi reduzida a quatro vias representativas, abrangendo o período de 1850 a 2100. Essas vias levam em consideração o impacto das concentrações de dióxido de carbono (CO_2) e aerossóis na atmosfera, sendo um cenário de mitigação com baixo nível de forçamento radiativo (RCP 2.6), dois cenários de estabilização média (RCP 4.5 e RCP 6) e um cenário de alta emissão (RCP 8.5) (VAN VUUREN et al., 2011).

As projeções climáticas para o bioma Mata Atlântica, indicam uma maior frequência de eventos extremos de calor e secas a partir da segunda metade do século XXI (IPCC, 2018). Os cenários de mudanças climáticas previstos para a Mata Atlântica brasileira são o RCP 4.5 com aumento na temperatura de 0.5 a 2.5°C, demanda evaporativa e $[CO_2]$ de 536-580ppm e, o RCP 8.5 com aumento na temperatura de 3 a 4°C, demanda evaporativa e $[CO_2]$ de 900-936ppm, causando estiagens prolongadas (IPCC, 2014). Além disso, secas associadas a elevadas temperaturas na região nordeste e inundações acompanhadas de temperaturas mais baixas nas regiões sul e sudeste são esperadas (Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas-PBMC, 2014).

A Mata Atlântica brasileira é um dos *hotspots* de biodiversidade mais ameaçados e vulneráveis às mudanças climáticas (SCARANO; CEOTTO, 2015). Além disso, uma característica desse bioma é a ocorrência de florestas tropicais úmidas e a ocorrência de eventos climáticos extremos pode comprometer a sobrevivência das espécies nativas (FAHAD et al., 2017). Isso causa uma preocupação sobre o futuro das espécies desse bioma, como o *Paubrasilia echinata* Lam., conhecida popularmente como pau-brasil, é uma espécie nativa da Mata Atlântica que ocorre naturalmente desde o Rio Grande do Norte ao Rio de Janeiro e em plantios cultivados em outros biomas brasileiros (ESSER et al., 2019; MACEDO et al., 2019).

As populações de pau-brasil possuem divergências genéticas (JUCHUM et al., 2008), anatômicas (MACEDO et al., 2020) e morfofisiológicas (GAMA, 2017) apresentando três ecotipos divergentes quanto ao hábito ecológico na fase inicial do crescimento, formato de folhas e coloração da madeira: folha pequena, média e grande. O ecotipo folha pequena possui maior ocorrência e hábito tolerante a sombra (MENGARDA et al., 2009; 2012); o ecotipo folha média possui hábito tolerante ao sol (GAMA et al., 2017); o ecotipo folha grande é mais raro, possui hábito tolerante ao sol (WERNER, 2009).

É importante ressaltar que as espécies tolerantes ao sol (pioneiras) se diferem das espécies tolerantes à sombra (não pioneiras) por apresentarem maiores taxas de fotossíntese, metabolismo e velocidade de crescimento (POORTER, et al., 2010), podendo apresentar diferentes respostas quando expostas ao aumento de [CO₂] (LEAKEY et al., 2009). Vale destacar que com o aumento da [CO₂] nas próximas décadas, são esperadas mudanças nos regimes térmico e hídrico, conseqüentemente uma ameaça para as plantas (HOLTMANN et al., 2021). No entanto, o impacto das mudanças climáticas nas florestas tropicais depende do nível de tolerância das espécies aos estresses abióticos (BÉLLARD et al., 2014). E, avaliar a dinâmica da fotossíntese, produção/alocação de carbono e o crescimento constituem uma importante ferramenta de avaliação das respostas fisiológicas das plantas em condições atmosféricas alteradas (CALVO-RODRIGUES et al., 2021), além de carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular.

Diante do exposto, conhecer a ecofisiologia de plantas de ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* em cenários de mudanças climáticas da Mata Atlântica, Brasil, permitirá entender sobre o futuro destas espécies diante dos cenários de mudanças climáticas previstos, além de auxiliar na conservação e no processo de expansão de plantios da espécie.

2. HIPÓTESES

Considerando o hábito ecológico dos ecotipos de *P. echinata* e as mudanças climáticas previstas, surgem as seguintes hipóteses:

- O ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) será mais vulnerável aos cenários futuros em relação ao ecotipo folha média (tolerante ao sol), considerando que

as plantas de sombra apresentam maior crescimento inicial em locais sombreados, frescos e úmidos e as plantas de sol apresentam maior crescimento inicial em locais ensolarados, quentes e secos (POORTER et al., 2010; ROSSATO; KOLB, 2010).

- Com baixa disponibilidade hídrica, as plantas tolerantes à sombra deverão apresentar menor eficiência fotoquímica nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 do que as plantas tolerantes ao sol.
- Em condições de elevada [CO₂] atmosférica, as plantas tolerantes à sombra deverão apresentar menor alocação de carbono para raízes e parte aérea do que plantas tolerantes ao sol.

3. OBJETIVO GERAL

Avaliar as respostas ecofisiológicas de plantas jovens dos ecotipos folha pequena (tolerante a sombra) e folha média (tolerante ao sol) de *P. echinata*, submetidas a três diferentes cenários climáticos: um controle (floresta Atlântica atual) e duas Vias de Concentração Representativas (RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80%-controle e 40%-restrição hídrica).

3.1. Objetivos específicos

- Avaliar o crescimento e as trocas gasosas em plantas dos ecotipos de *P. echinata* tolerantes à sombra e ao sol expostas aos três cenários climáticos e dois níveis de umidade no substrato.
- Determinar o potencial hídrico foliar, índice de estresse hídrico da cultura e avaliar o desempenho da fluorescência transiente da clorofila *a* em plantas dos dois ecotipos de *P. echinata* nas mesmas condições ambientais descritas anteriormente.
- Quantificar os teores dos polímeros de parede celular (celulose, hemicelulose e lignina) e carboidratos não estruturais (amido e açúcares solúveis) em folhas, caules e raízes em plantas dos dois ecotipos de *P. echinata* nas mesmas condições ambientais descritas anteriormente.

4. REVISÃO DE LITERATURA

4.1. *Paubrasilia echinata* Lam.

O *Paubrasilia echinata* Lam., Fabaceae: Caesalpinioideae, E. Gagnon, H.C. Lima & G.P. Lewis, conhecida popularmente como pau-brasil, é uma espécie arbórea tropical nativa da Mata Atlântica que ocorre desde o Rio Grande do Norte ao Rio de Janeiro e em plantios cultivados em outros biomas brasileiros (ESSER et al., 2019; MACEDO et al., 2019). Apresenta importância histórica e econômica, sofreu um intenso extrativismo desde a colonização do país. É utilizado na extração de corantes (brasilina e brasileína), para produção de tintas/pigmentos e sua madeira utilizada na fabricação de instrumentos musicais de qualidade, sendo relevante dentro do setor industrial (FRANCO; YOJO, 2008).

No Brasil, a exploração da Mata Atlântica ocorre principalmente devido ao desenvolvimento econômico e expansão agrícola, comprometendo grande parte dos fragmentos (ALMEIDA et al., 2011; SERRANO et al., 2013). Com apenas 12,4% de sua vegetação nativa, as maiores ameaças ao bioma são o desmatamento e as queimadas florestais (FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2020a; 2020b). A redução das populações naturais em função dessa super exploração e desmatamento excessivo, a espécie é considerada em perigo de extinção (IBAMA nº 37 1992; The IUCN Red List of Threatened Species, 1998).

A Mata Atlântica é um bioma de floresta tropical que constitui um complexo de ecossistemas, abrigando uma parcela significativa da biodiversidade mundial (STEHMANN et al., 2009). Por esse motivo, é considerado um hotspot global para conservação da biodiversidade, devido à sua riqueza de espécies e endemismo, embora seja um dos biomas mais explorados e ameaçados do mundo (ARAUJO et al., 2015; FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA, 2017).

As populações de pau-brasil possuem divergências genéticas (JUCHUM et al., 2008), anatômicas (MACEDO et al., 2020) e morfofisiológicas (GAMA, 2017) apresentando três ecotipos divergentes quanto ao hábito ecológico na fase inicial do crescimento, formato de folhas e coloração da madeira: folha pequena (“arruda”), média (“laranja”) e grande (“café”). O ecotipo folha pequena possui maior ocorrência, sendo encontrado ao longo da costa brasileira, apresenta folhas bipinadas com os menores foliólulos, cerne de cor alaranjado e hábito tolerante a sombra (MENGARDA et al.,

2009; 2012). O ecotipo folha média possui folhas bipinadas contendo foliólulos maiores (JUCHUM et al., 2008), cerne de cor laranja-avermelhado e hábito tolerante ao sol (GAMA et al., 2017), com populações naturais ocorrentes no Rio de Janeiro, Espírito Santo e interior sul da Bahia (MACEDO et al., 2018; 2019) (Fig. 1). O ecotipo folha grande é mais raro, possui folhas pinadas não foliólada, ocorre apenas no sul da Bahia, tem hábito tolerante ao sol e cerne de cor vermelho escuro (WERNER, 2009).

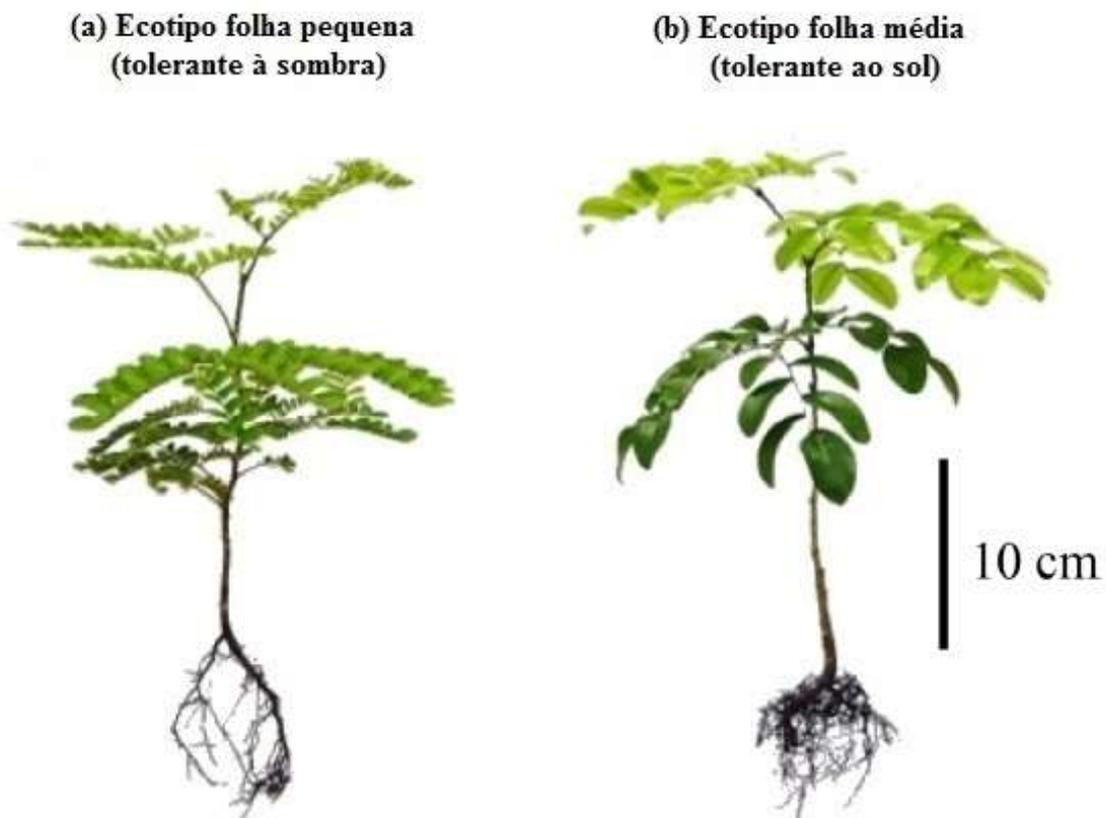


Figura 1. Morfologia de plantas de um ano de idade dos ecotipos folha pequena (a) e folha média (b) de *Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, HCLima e GPLewis antes do início do experimento

Esse hábito de tolerância ao sol e a sombra dos diferentes ecotipos de pau-brasil merece melhor entendimento diante das mudanças climáticas. Tendo em vista que os estudos com pau-brasil são mais voltados para analisar o efeito da adubação na fisiologia e na anatomia (CANAL, 2010), germinação de sementes e produção de mudas sob efeito de sombreamento (AGUIAR et al., 2005) e efeitos da luminosidade e sombreamento no crescimento e fisiologia das plantas (GARCIA et al., 2006; RONDON et al., 2006; MELLO; BARBEDO, 2007; MENGARDA et al., 2009, GAMA, 2012, GAMA, 2017).

Cabe ressaltar que apesar de toda a sua importância ecológica, histórica e sociocultural, o pau-brasil ainda se encontra na Lista Vermelha da Flora Brasileira (CNCFlora, 2012). Destaca-se que estudos sobre espécies ameaçadas de extinção são prioritários para definir estratégias de conservação (LIMA, 2003), reforçando a importância de aprimorar técnicas e conhecimento para produção de mudas que possuam crescimento potencial à sua permanência vital no campo.

4.2. Efeitos do CO₂ na ecofisiologia de plantas

O dióxido carbônico (CO₂) é o principal gás do efeito estufa emitido por atividades humanas. Nas plantas o CO₂ atua como substrato, um importante elemento empregado na etapa química como fonte do carbono incorporado em moléculas orgânicas, sendo essencial para a fotossíntese (TAIZ et al., 2017). Nos últimos 250 anos, a [CO₂] na atmosfera aumentou 30% e as previsões de subida são de 1 a 2% ao ano até o final do desse século (OLIVIER; PETERS, 2020).

Em maio de 2020, foi estabelecido um novo recorde climático, onde os níveis de CO₂ na atmosfera atingiram 417.16 ppm, alcançando a maior concentração na série histórica. A estimativa é de ultrapassar 427 ppm em 2025 (DE LA VEGA et al., 2020).

O aumento crescente da [CO₂] influencia diretamente a fisiologia das plantas nos três processos principais: modulação da atividade da RuBisCO (ribulose 1,5 bisfosfato carboxilase/oxinase), sensibilidade das células-guarda dos estômatos e modulação da respiração mitocondrial (SAGE, 2002). Em algumas espécies, o aumento da [CO₂] estimula a fotossíntese por elevar a concentração intracelular de carbono, diminuir a condutância estomática e a transpiração, elevando a eficiência do uso da água nas plantas (LEAKEY et al., 2009).

Além disso, a elevada concentração de CO₂ promove incremento na fotossíntese justamente pela atividade da Rubisco, a enzima mais abundante na natureza (ELLIS, 1979), e a principal catalizadora nas reações de assimilação de CO₂ atmosférico pelas plantas através da carboxilação da ribulose-1,5-bisfosfato (RuBP) (STITT, 1991). Com isso, em CO₂ elevado a atividade de carboxilação é estimulada (MARENCO et al., 2014). Assim, o aumento da [CO₂] pode estimular o crescimento das plantas, especialmente de plantas de espécies C₃, caracterizando o efeito fertilizante do carbono (HAVERD et al., 2020).

Estudos realizados sob uma atmosfera enriquecida com CO₂ a produção de biomassa e o rendimento das plantas podem aumentar significativamente

(BERNACCHI et al., 2005; REDDY et al., 2010). Elevadas concentrações de CO₂ estimulam a fotossíntese, promovendo aumento da produtividade e melhorando o ciclo da água e nutrientes das plantas (KIMBALL et al., 2002; NOWAK et al., 2004). Experimentos realizados em condições controladas revelam que o dobro da concentração atmosférica de CO₂ atual, acrescenta a fotossíntese da folha de 30% a 50% em espécies de plantas C3 e de 10% a 25% em espécies C4 (AINSWORTH; LONG, 2005).

Considerando que a fotossíntese de muitas espécies poderá aumentar com a elevação da [CO₂], estudos para prever como os processos fisiológicos de espécies arbóreas tropicais responderão às mudanças climáticas são necessários, pois é importante conhecer como os mecanismos fisiológicos irão afetar crescimento das plantas (WALTER et al., 2015). Destaca-se que os efeitos benéficos do CO₂ na fotossíntese e crescimento podem ser anulados pela elevação da temperatura atmosférica e reduções na disponibilidade hídrica associados ao aumento da [CO₂] (WALTER et al., 2015).

4.3. Efeitos da temperatura do ar na ecofisiologia de plantas

Cada espécie possui uma temperatura ótima para o funcionamento de seu metabolismo, sendo que temperaturas fora da faixa ideal podem promover alterações nos processos metabólicos, provocando danos fisiológicos irreversíveis (KERBAUY, 2019). A exposição das plantas às elevadas temperaturas gera uma série de distúrbios no metabolismo, afetando diretamente a fotossíntese e o crescimento (TARVAINEN et al., 2021). A exposição de muitas plantas à altas temperaturas aumenta a respiração e fotorrespiração, favorecendo as perdas de carbono e afetando o desempenho fotossintético (YAMORI et al., 2014; HERPPICH et al., 2020; WANG et al., 2020).

A temperatura afeta os processos regulatórios da membrana celular e ajustes enzimáticos (RAY et al., 2004). As altas temperaturas aceleram os processos de evapotranspiração (TAIZ; ZEIGER, 2013) alterando, portanto, o metabolismo celular e, conseqüentemente, da planta como um todo. Enquanto, temperaturas baixas reduzem a taxa fotossintética devido à menor condutância estomática, resultante de limitações difusivas e metabólicas (SANTOS et al., 2011; NÓIA JÚNIOR et al., 2018a).

Além disso, é importante salientar que o aumento de temperatura poderá provocar danos no crescimento inicial de plantas mais sensíveis ao calor, independentemente da divergência intraespecífica da espécie. Contudo, o ecotipo

tooperante a sombra pode apresentar maior sensibilidade aos impactos das mudanças climáticas no seu metabolismo em função de seu hábito tolerante a sombra (CUZZUOL et al., 2021).

No panorama das mudanças climáticas, o aquecimento global será um dos principais fatores de estresse aos quais as plantas terão que se adaptar para sobreviver (ZANDALINAS et al., 2021). O estresse térmico é caracterizado por um aumento na temperatura além no nível crítico ou limite por um período necessário para o desenvolvimento de danos irreversíveis ao crescimento, este nível de resistência da planta ao calor depende da espécie e varia geneticamente (JAGADISH et al., 2021).

Diversos autores demonstraram que as respostas das plantas à temperatura também podem ser influenciadas por outras variáveis climáticas, como déficit de pressão de vapor e disponibilidade hídrica (VICENTE-SERRANO et al., 2019; AMARAL et al., 2021; BARTLETT; SINCLAIR, 2020).

4.4. Efeitos da disponibilidade hídrica na ecofisiologia de plantas

O conhecimento de como as plantas de florestas tropicais, especialmente da Mata Atlântica, respondem às mudanças das condições ambientais, como aumento na concentração de CO₂ em interação com outros fatores ambientais, como o déficit hídrico é de grande relevância, tendo em vista que as respostas ecofisiológicas em condições de elevado CO₂ atmosférico podem diferir de acordo com a disponibilidade de água para a planta (CERNUSAK et al., 2013). Essa disponibilidade de água no solo é um dos principais fatores abióticos que afeta diretamente o crescimento e a produtividade das arbóreas tropicais é o déficit hídrico (LISAR et al., 2012).

O estresse hídrico provoca mudanças fisiológicas nas espécies arbóreas, incluindo perda de turgor celular, ajuste osmótico, redução do potencial hídrico foliar, senescência e abscisão foliar (ZLATEV et al., 2012). Além de fechamento dos estômatos, redução da atividade de carboxilação da RuBisCO e a concentração intracelular de carbono (LEAKEY et al., 2009; PILON et al., 2018). Essas respostas das plantas à redução de disponibilidade hídrica são complexas e envolvem diversos processos bioquímicos e morfofisiológicos, podendo limitar a fotossíntese e o potencial hídrico das plantas por afetar o consumo de assimilados nas folhas e o transporte pelo floema (PARKASH; SINGH, 2020).

Um fator crítico na regulação celular é a pressão de turgor que impulsiona o volume das células, dependendo da extensibilidade da parede celular. A baixa pressão

de turgescência provocada pelo estresse hídrico reduz ou até mesmo inibe o crescimento por redução da expansão celular (WOLF; GREINER, 2012). As mudanças morfológicas nas plantas ocasionadas pelo estresse hídrico são resultado de modificações na parede celular induzindo diminuição na sua espessura, refletindo uma menor alocação de carbono estrutural o que impede a adaptação do sistema hidráulico para seca (BALDUCCI et al., 2014).

Fonseca (2021) demonstrou que o ecotipo tolerante ao sol (folha média), bem adaptado a ambientes mais quentes e secos, quando submetido ao déficit hídrico mostra um declínio menos expressivo do potencial hídrico foliar e dos parâmetros da fotossíntese e fluorescência da clorofila *a*, diferentemente do ecotipo tolerante a sombra (folha pequena) ao mostrar menor tolerância nas mesmas condições. Esse mesmo autor relatou que a tolerância do ecotipo tolerante ao sol é atribuída à sua maior capacidade de acumular açúcares e lignina em seus tecidos, refletindo nas estratégias de alocação de carboidratos para tolerar à seca. Fonseca (2021) sugeriu que nas próximas décadas, caso as secas ocorram nas áreas de Mata Atlântica, é possível que a população natural do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) sofra uma redução devido a sua menor tolerância ao déficit hídrico em relação ao ecotipo folha média (tolerante ao sol).

4.5. Efeitos do déficit de pressão de vapor na ecofisiologia de plantas

O déficit de pressão de vapor (DPV) é uma variável climática importante para melhor compreensão das respostas fisiológicas em cenários de mudanças das variáveis ambientais (NGUGI et al., 2004). O DPV está diretamente associado à temperatura do ar, pois esta controla a flutuação do DPV entre a cavidade estomática e a atmosfera (AMITRANO et al., 2019). Com o aumento do DPV as plantas tendem a fechar os estômatos, reduzindo as trocas gasosas por afetar a difusão de vapor de água e CO₂ (BOURNE et al., 2015). Além disso, o aumento da demanda evaporativa provoca redução da transpiração e aumenta a perda de água, comprometendo a fixação do CO₂ (NÓIA JÚNIOR et al., 2020). Entretanto, o incremento da [CO₂] pode promover o aumento da assimilação líquida de CO₂ e da concentração intracelular de carbono, mitigando os efeitos do DPV na fotossíntese (LEAKEY et al., 2009).

Com a eminência das mudanças climáticas e a importância da dinâmica do carbono no crescimento e sobrevivência das plantas, Cuzzuol et. al (2021) avaliaram como os carboidratos não estruturais e os polímeros de parede celular de ecotipos tolerantes à sombra e ao sol de *P. echinata* responderiam às mudanças no DPV em

temperaturas previstas para a região sudeste do Brasil nas próximas décadas. Esses autores observaram que a alocação de carbono mostrou ser mais influenciada pelo DPV em plantas do ecotipo tolerante a sombra em relação ao ecotipo tolerante ao sol, concluindo que em baixo DPV o crescimento axial do caule pode ser inibido em plantas jovens do ecotipo tolerante ao sol.

Existe uma possibilidade das espécies tolerantes à sombra e ao sol manterem a fotossíntese elevada devido uma maior concentração intracelular de carbono. Mesmo com menor abertura dos estômatos, as plantas conseguem concentrar mais carbono no interior das células em CO_2 elevado, independentemente dos outros fatores climáticos (LONG et al., 2004).

Diante disso surge uma questão: o aumento da $[\text{CO}_2]$ prevista para os próximos anos será capaz de mitigar os efeitos da temperatura e DPV na ecofisiologia das arbóreas tropicais tolerantes à sombra e ao sol? A compreensão dos efeitos de fatores climáticos associados ao DPV na ecofisiologia dessas plantas torna-se fundamental para uma seleção mais precisa de espécies menos sensíveis frente às mudanças climáticas previstas (AMARAL et al., 2021).

4.6. Estrutura dos carboidratos não estruturais e suas relações com o ambiente

Os carboidratos são resultantes da fixação de carbono no processo de fotossíntese e apresentam várias funções nas plantas, sobretudo o armazenamento e translocação de carbono, e proteção contra condições ambientais adversas, como a restrição hídrica, elevado CO_2 e altas temperaturas (TAIZ et al., 2017), por isso são considerados sinalizadores de estresse nas plantas (MARTINEZ-VILALTA et al., 2016). As plantas apresentam carboidratos com reserva solúveis e insolúveis, além disso, a estrutura química e a concentração desses compostos variam entre espécies, órgãos vegetativos e reprodutivos, tecidos e células, ao longo do dia e nas diferentes estações do ano (SOUZA et al., 2018).

A sacarose é um dos principais carboidratos encontrado nas plantas. Devido à sua natureza não redutora, esse açúcar pode ser translocado e armazenado nos vacúolos celulares. É uma molécula altamente solúvel que retém a maior energia livre da hidrólise para ligação glicosídica. Além de fornecer substrato para síntese de material celular e de outros carboidratos de reserva, como por exemplo, o amido e os frutanos, a sacarose atua como molécula sinalizadora do metabolismo, por meio de modulação da expressão gênica (FARRAR et al., 2000; SMITH; STITT, 2007). Os monossacarídeos

glicose e frutose ocorrem em todas as plantas vasculares, tanto como produtos de hidrólise, quanto dissacarídeo. Além disso, constituem os principais esqueletos de carbono para a síntese de intermediários dessas vias, sendo unidades para a síntese de oligo e polissacarídeos (MOLLE, 2009, SOUZA et al., 2005).

O segundo principal carboidrato em plantas é o amido e possui função de reserva. Os locais de deposição ocorrem em cloroplastos, amiloplastos e tecidos não-fotossintetizantes. O acúmulo de amido geralmente ocorre em grânulos que variam em forma e tamanho entre as diferentes espécies de plantas. Nos cloroplastos, o amido é acumulado nos períodos durante o dia, sendo rapidamente degradado no período da noite e seus produtos exportados para o citosol, onde são convertidos em sacarose. Nos amiloplastos de sementes, raízes e tubérculos, o amido é acumulado por períodos mais prolongados e mobilizado quando o crescimento é retomado (HARTMANN; TRUMBORE, 2016). Em plantas tolerantes ao sol crescendo em CO₂ elevado, ocorre aumento do acúmulo de amido nas folhas, tendo um efeito “tampão”, aumentando a produção de biomassa e o crescimento (ARENQUE et al., 2014).

Mesmo sendo os carboidratos mais abundantes, muitas espécies não utilizam o amido e a sacarose como fonte primária de carbono, mas sacarosil-oligossacarídeos altamente solúveis, como os frutanos e oligossacarídeos (HOCH et al., 2003). Os frutanos constituem o terceiro grupo de carboidratos não estruturais de maior ocorrência entre os vegetais. São polímeros de frutose derivados da sacarose e consistem de séries homólogas de oligo e polissacarídeos não redutores (CARVALHO; FIGUEIREDO-RIBEIRO, 2001).

Em condições estressantes as plantas podem desenvolver estratégias para manter o crescimento e a produtividade, um deles são os ajustes bioquímicos no metabolismo de carboidratos e composição da parede celular (BUCKERIDGE; AIDAR, 2002). Em condições de altas temperaturas um dos efeitos nas plantas é a redução na fotossíntese, comprometendo a concentração de carboidratos e causando alterações na composição da parede celular (KOTAK et al., 2007; LIMA et al., 2010). Já sob condições de estresse hídrico, para favorecer a turgescência celular, ocorrem ajustes no metabolismo celular como acúmulo de carboidratos solúveis (GERSONY et al., 2020). Nessas condições, ocorrem reduções no potencial hídrico foliar, diminuindo a regulação dos genes relacionados à fotossíntese e à disponibilidade de CO₂ (OSAKABE et al., 2014)

Quanto ao CO₂, em quantidades insuficientes limitam o crescimento das plantas, por afetar diretamente os processos de trocas gasosas. Entretanto, o incremento da

[CO₂] altera as quantidades de carboidratos não estruturais, como o amido e açúcares solúveis, principalmente devido ao aumento da atividade fotossintética, contudo, um maior acúmulo de açúcares pode alterar a integridade dos cloroplastos e consequentemente provocar uma redução da fotossíntese por aclimação (LONG et al., 2004).

4.7. Estrutura dos polímeros de parede celular e suas relações com o ambiente

A parede celular se relaciona diretamente com as propriedades estruturais dos tecidos vegetais, sendo composta por três domínios: microfibrilar, péctico e proteico. O primeiro domínio é composto por celulose e hemicelulose. Este domínio está imerso no domínio péctico, o qual é rico em polissacarídeos altamente solúveis e de caráter ácido. O domínio das proteínas é composto por algumas proteínas estruturais e enzimas. A parede celular, também apresenta lignina e outros compostos derivados (BUCKERIDGE et al., 2000, BARBOSA et al., 2008, BUCKERIDGE et al., 2008).

As principais hemiceluloses encontradas em eudicotiledoneas como o *P. echinata* são respectivamente, o xiloglucano (HAYASHI; KAIDA, 2011) e o arabinoxilano (GIBEAUT; CARPITA, 1993). O xiloglucano é um polissacarídeo constituído por uma cadeia principal de glicose e xiloses ramificadas, podendo conter ramificações com galactose ligadas à xilose. O arabinoxilano é um polímero composto por uma cadeia principal de xilose com resíduos de arabinose. Tanto as hemiceluloses quanto as pectinas constituem uma classe de polissacarídeos, podendo ser composto por vários polissacarídeos diferentes. Uma mesma célula pode conter hemiceluloses combinadas como xilano, xiloglucano e glucano. Essa possibilidade de combinações confere diversidade funcional e estrutural à parede celular (BUCKERIDGE et al., 2008).

A parede celular é um compartimento metabolicamente ativo e dinâmico da célula vegetal que participa de processos fisiológicos da planta em resposta ao ambiente (LEGALL et al., 2015). Estes mesmos autores relatam que as plantas desenvolvem mecanismos de tolerância aos fatores abióticos como concentração de CO₂, temperatura e seca. Em plantas jovens com órgãos vegetativos com alta taxa de crescimento, por exemplo, o teor de hemiceluloses é diferente das encontradas em plantas adultas com tecidos maduros, onde não há expansão celular, atuando como sistema de defesa da planta aos fatores abióticos (WOLF et al., 2012).

Embora a arquitetura geral das células de parede celular seja semelhante entre as monocotiledôneas e eudicotiledôneas, onde ambos se consistem de fibras celulósicas envoltas por uma matriz não celulósica de polissacarídeos, a diferença observada entre os grupos ocorre nos tipos e na quantidade de polissacarídeos não celulósicos, proteínas e compostos fenólicos (VOGEL, 2008).

Por se tratar de uma eudicotiledônea, o pau-brasil (*Paubrasilia echinata*) apresenta uma parede celular do tipo I (CARPITA; GIBEAUT, 1993). As principais hemiceluloses esperadas são xiloglucanos, que compõem o domínio microfibrilar (celulose-hemicelulose). Além disso, a parede celular de espécies lenhosas apresenta uma proporção equilibrada entre celulose, hemicelulose e pectinas (VOGEL, 2008).

O pau-brasil ainda é pouco estudado em relação ao efeito do aumento da [CO₂] nas plantas e sua ecofisiologia, sobretudo o efeito na variação da composição dos polímeros de parede celular - PPC (celulose, hemicelulose e lignina). No entanto, na literatura há relatos do efeito do aumento da [CO₂] sobre os PPC em plantas de jatobá (*Hymenaea courbaril*) e jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) onde se observou aumento de celulose no caule (COSTA, 2004; GODOY, 2007).

5. REFERÊNCIAS

- ALMEIDA FS, GOMES DS, QUEIROZ JMDE. Estratégias para a conservação da diversidade biológica em florestas fragmentadas. *Revista do Setor de Ciências Agrárias e Ambientais* 7(2): 368-382. Doi: 10.5777/ambiencia.2011.02.01rb, 2011.
- AMANDA P. DE SOUZAA, B, ADRIANA GRANDISA, BRUNA C. ARENQUE-MUSA AND MARCOS S. BUCKERIDGE A, C. Diurnal variation in gas exchange and nonstructural carbohydrates throughout sugarcane development. *Functional Plant Biology*. <https://doi.org/10.1071/FP17268>. 2018.
- AMITRANO, C.; ARENA, C.; ROUPHAEL, Y.; DE PASCALE, S.; DE MICCO, V. Vapour pressure deficit: The hidden driver behind plant morphofunctional traits in controlled environments. *Ann Appl Biol.*, 1–13, 2019.
- ARENQUE, B.C.; GRANDIS, A.; POCIUS, O.; DE SOUZA, A.P.; BUCKERIDGE, M.S. Responses of *Senna reticulata*, a legume tree from the Amazonian floodplains, to elevated atmospheric CO₂ concentration and waterlogging. *Trees, Structure and Function*, v. 28, n. 4, p. 1021-1034, 2014.
- ARENQUE, B.C.; GRANDIS, A.; POCIUS, O.; SOUZA, A.P.; BUCKERIDGE, M.S. Responses of *Senna reticulata*, a legume tree from the Amazonian flood plains, to elevated atmospheric CO₂ concentration and water logging. *Trees*, 28:1021-1034, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0>.

AVIGAD, C. & Dey, P. M. Carbohydrate metabolism: storage carbohydrates. Pp. 143-203. In: P.M. Dey & J.B Harborne (eds.). *Plant Biochemistry*. London, Academic Press, 1997.

BALDUCCI, L.; DESLAURIERS, A.; GIOVANNELLI, A.; BEAULIEU, M.; DELZON, S.; ROSSI, S.; RATHGEBER, C.B.K. How do drought and warming influence survival and wood traits of *Picea mariana* saplings? **Journal Experimental Botany**. 4, 1–13, 2014.

BÉLLARD C.; LECLERC C.; LEROY B.; BAKKENES M.; VELOZ S.; THUILLER W.; COURCHAMP F. Vulnerability of biodiversity hotspots to global change. **Global Ecology & Biogeography**, vol 23: 1376–1386, 2014.

BOURNE, A.E.; HAIGH, A.M.; ELLSWORTH, D.S. Stomatal sensitivity to vapour pressure deficit relates to climate of origin in *Eucalyptus* species. **Tree Physiology**, 35, 266–278, 2015.

BUCKERIDGE, M. S.; AIDAR, M. P. M.; MARTINEZ, C. A.; SILVA, E. A. Respostas de plantas às mudanças climáticas globais. In: BUCKERIDGE, M. S. *Biologia e Mudanças Climáticas no Brasil*, p.77-91, 2007.

BUCKERIDGE, M. S.; CAVALARI, A. A.; SILVA, G. B. Parede Celular. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). *Fisiologia Vegetal*. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 165-181, 2008.

BUCKERIDGE, M.S.; AIDAR, M.P.M. Carbon sequestration in the rain forest: alternatives using environmentally friendly biotechnology. **Biota Neotropica**, v. 2, n. 1, p. 1-5, 2002.

CNCFlora, 2012. *Caesalpinia echinata* in Lista Vermelha da flora brasileira versão 2012.2 Centro Nacional de Conservação da Flora. Disponível em [http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Caesalpinia echinata](http://cncflora.jbrj.gov.br/portal/pt-br/profile/Caesalpinia%20echinata)

CALVO-RODRIGUEZ, S.; SÁNCHEZ-AZOFEIFA, G.A.; DURÁN, S.M.; ESPÍRITO-SANTO, M.M.; NUNES, Y.R.F. Dynamics of Carbon Accumulation in Tropical Dry Forests under Climate Change Extremes. **Forests**, 12, 106, 2021. <https://doi.org/10.3390/f12010106>

CARDOSO, J. T. A Mata Atlântica e sua biodiversidade. *Encontros Teológicos | Florianópolis | V.31 | N.3 | Set.-Dez. 2016 | p. 441-458.*

Carvalho, M.A.M. & Figueiredo-Ribeiro, R.C.L. 2001. Frutanos: ocorrência, estrutura e utilização, com ênfase em plantas do cerrado brasileiro. Pp. 77-89. In: Lajolo, F.M.; Saura-Calixto, F.; Penna, E.W. & Menezes, E.W. (eds.). *Fibra Dietética em Iberoamérica: Tecnologia y Salud*. São Paulo, Livraria Varela

CERNUSAK, L. A.; WINTER, K.; DALLING, J.W; HOLTUM, J. A. M.; JARAMILLO, C.; KÖRNER, C.; LEAKEY, A. D. B.; NORBY, R. J.; POULTER, B. TURNER, B. L.; WRIGHT, S. J. Respostas das florestas tropicais ao aumento do CO₂ atmosférico: conhecimento atual e oportunidades para futuras pesquisas. **Functional Plant Biology**, v. 40, n. 6, p. 531-551, 2013. doi: 10.1071 / fp12309

COSTA, P.M.F. Efeitos da alta concentração de CO₂ sobre o crescimento e o estabelecimento de plântulas do jatobá de mata *Hymenaea courbaril* L. var. *stilbocarpa* (Heyne) Lee & Langenheim (Leguminosae, Caesalpinioideae, Detarieae). Tese apresentada ao Instituto de Biologia para obtenção do Título de Mestre em Biologia Celular e Estrutural na área de Biologia Celular. 77p., 2004.

CUZZUOL, G.R.F.; GALVÃO, E.K.S.; WERNER, E.T.; PEZZOPANE, J.E.M.; GASPARINI, X.S.S. Carbon reservoirs in shade-tolerant morphotype of *Paubrasilia echinata* are more susceptible to humidity and temperature changes than sun-tolerant morphotype. **Flora**, 287,151991, 2021.

DE LA VEGA, E.; CHALK, T.B.; WILSON, P.A.; BYSANI, R.P.; FOSTER, G.L. Atmospheric CO₂ during the Mid- Piacenzian Warm Period and the M2 glaciation. **Scientific Reports**, p. 14–21, 2020.

ESSER, L; SARAIVA, D; JARENKOW, J. Future uncertainties for the distribution and conservation of *Paubrasilia echinata* under climate change. *Acta Botanica Brasilica* - 33(4): 770-776, 2019.

FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; ADKINS, S.; WU, C.; WNAG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v.8, 2017.

FARRAR, J.; POLLOCK, C. & GALLAGHER, J. 2000. Sucrose and the integration of metabolism in vascular plants. *Plant Science* 154: 1-11.

FINEGAN, B. Forest succession. *Nature* 312, 109–114, 1984.

FONSECA, C.L.S. Respostas fotossintéticas e dinâmica de carbono em plantas de dois morfotipos de *Paubrasilia echinata* sob estresse hídrico seguido de reidratação. Universidade Federal do Espírito Santo. **Tese de doutorado**, 2021.

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA (2020a). Desmatamento na Mata Atlântica cresce quase 30%. <https://www.sosma.org.br/noticias/desmatamento-na-mata-atlantica-cresce-quase-30/>

FUNDAÇÃO SOS MATA ATLÂNTICA (2020b). Incêndios em áreas florestais da Mata Atlântica aumentam quase 10%. <https://www.sosma.org.br/noticias/desmatamento-na-mata-atlantica-cresce-quase-30/>

GAGNON, E.; BRUNEAU, A.; HUGHES, C.E.; QUEIROZ, L.P.; LEWIS, G.P. A new generic system for the pantropical *Caesalpinia* group (Leguminosae). **PhytoKeys**, v.71, p.1–160, 2016.

GAMA, V.N. Caracterização morfofisiológica e bioquímica de três morfotipos de *Paubrasilia echinata* Lam. Exposta a condições de irradiância. **Tese** (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.

GERSONY, J.T.; HOCHBERG, U.; ROCKWELL, F.E.; PARK, M.; GAUTHIER, P.P.G.; HOLBROOK, N.M. Leaf Carbon Export and Nonstructural Carbohydrates in Relation to Diurnal Water Dynamics in Mature Oak Trees. **Plant Physiology**, August, Vol. 183, pp. 1612–1621, 2020.

GODOY, J.F.L. Ecofisiologia do estabelecimento de leguminosas arbóreas da Mata Atlântica, pertencentes a diferentes grupos funcionais, sob atmosfera enriquecida com CO₂: uma abordagem sucessional. Tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Biodiversidade e Meio Ambiente do Instituto de Botânica de São Paulo. 109p., 2007.

HARTMANN, H. AND TRUMBORE, S. Understanding the roles of nonstructural carbohydrates in forest trees – from what we can measure to what we want to know. *New Phytol*, 211: 386-403 2016.

HOCH, G., RICHTER, A. & KÖRNER, CH. Non-structural carbon compounds in temperate forest trees. *Plant, Cell and Environment* 26: 1067-1081. 2003.

HOLTMANN, A.; HUTH, A.; POHL, F.; REBMANN, C.; FISCHER, R. Carbon Sequestration in Mixed Deciduous Forests: The Influence of Tree Size and Species Composition Derived from Model Experiments. *Forests*, 12(6):726, 2021.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Summary for policymakers. In: Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P. M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, pp. 1 – 30, 2013.

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Aquecimento global de 1,5 ° C. Um relatório especial do IPCC sobre os impactos do aquecimento global de 1,5 ° C. Sumário para Formuladores de Políticas. Eds. Masson-Delmotte V, Zhai P, Pörtner HO, Roberts D, Skea J, Shukla PR, et al. Tradução: Mariane Arantes Rocha de Oliveira, 2018.

IPCC - Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas. Summary for policymakers, in Climate Change 2014: impacts, adaptation, and vulnerability. In Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Eds. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, et al. (Cambridge; New York, NY: Cambridge University Press), 1–32, 2014.

JAGADISH, S.V.K.; WAY, D.A.; SHARKEY, T.D. Plant heat stress: Concepts directing future research. *Plant Cell Environ.*, 1–14, 2021.

JIAO, X.C.; SONG, X.M.; ZHANG, D.L.; DU, Q.J.; LI, J.M. Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. *Scientific Reports*, 9(1), 2019. doi:10.1038/s41598-019-45232-w

JOLY, C.A.; METZGER, J.P.; TABARELLI, M. Experiences from the Brazilian Atlantic Forest: ecological findings and conservation initiatives. *New Phytologist*, 204, 3, 2014.

JUBB, I.; CANADELL, P. and DIX, M. Representative Concentration Pathways (RCPs). Australian Climate Change Science Program, 2016.

JUCHUM, F.S., COSTA, M.A., AMORIM, A.M., CORRÊA, R.X. Phylogenetic relationships among morphotypes of *Caesalpinia echinata* Lam. (Caesalpinioideae: leguminosae) evidenced by trnL intron sequences. **Naturwissenschaften**, 95, 1085–1091, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0424-6>.

KERBAUY, G.B. **Fisiologia Vegetal**. 3ª Ed. Guanabara, 420p., 2019.

KOTAK, S.; LARKINDALE, J.; LEE, U.; VON KOSKULL-DÖRING, P.; VIERLING, E.; SCHARF, K.D. Complexity of the heat stress response in plants. **Curr. Opin. Plant Biol.**, 10, 310–316, 2007.

LE GALL, H., PHILIPPE, F., DOMON, J. M., GILLET, F., PELLOUX, J., & RAYON, C. Cell Wall Metabolism in Response to Abiotic Stress. **Plants** (Basel, Switzerland), 4(1), 112–166. 2015.

LE GALL, H., PHILIPPE, F., DOMON, J. M., GILLET, F., PELLOUX, J., & RAYON, C. Cell Wall Metabolism in Response to Abiotic Stress. **Plants** (Basel, Switzerland), 4(1), 112–166. 2015.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ROGERS, A.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, v. 60, n.10, p. 2859-2876, 2009. doi:10.1093/jxb/erp096

LIMA HC. Taxonomia e distribuição geográfica atual de *Caesalpinia echinata* Lam. In: Simpósio “Paubrasil: Ciência e Arte”. FAPESP. 2003. São Paulo CD ROM.

LIMA, H.C. Paubrasilia. In: Flora do Brasil 2020 em construção. Rio de Janeiro, Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2020.

LIMA, R.B.; SANTOS, DOS, T.B.; VIEIRA, L.G.E.; DE LOURDES LÚCIO FERRARESE, M.; FERRARESE-FILHO, O.; DONATTI, L.; BOEGER, M.R.T.; DE OLIVEIRA PETKOWICZ, C.L. Heat stress causes alterations in the cell-wall polymers and anatomy of coffee leaves (*Coffea arabica* L.). **Carbohydr. Polym**, 93, 135–143, 2013.

LISAR, S.Y.S.; MOTAFAKKERAZAD, R.; HOSSAIN, M.M.; RAHMAN, I.M.M. Water stress in plants: Causes, effects and responses. In *Water Stress*; Rahman, M., Hasegawa, H., Eds.; InTech: Rijeka, Croatia, pp. 1–14. 2012.

LONG, S. P.; AINSWORTH E. A.; ROGERS A.; ORT D. R. Rising atmospheric carbon dioxide: Plants FACE the future. **Annual Review of Plant Biology**, v. 55, p. 591-628, 2004.

MACEDO, T. M., H. C. D. LIMA, N. D. DE SOUZA, A. C. GONÇALVES, C. G. COSTA, AND C. F. BARROS. Intraspecific variation of *Paubrasilia echinata* (Fabaceae) wood along a latitudinal gradient in Brazil. **Flora**, 258:151437, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2019.151437>

MACEDO, T.M.; BARROS, C.F.; DE LIMA, H.C.; BRANDES, A.F.N.; DA COSTA, W.S.; COSTA, C.G.; ROIG, F. Climate signals in tree rings of *Paubrasilia echinata* (Leguminosae-Caesalpinioidea) from the Atlantic Forest of Brazil. **Trees - Structure and Function**, 2020.

MACEDO, T.M.; SILVA, A.V.S.; GONÇALVES M.L.A.; AGUIAR-DIAS, A.C.A. Pau-brasil: como conservar sem conhecer? *Diversidade e Gestão*, 2(2): 189-197. 2018.

MAKSIC, J.; VENANCIO, I. M.; SHIMIZU, M. H.; CHIESSI, C. M.; PIACSEK, P.; OLIVEIRA, G. S.; CRUZ, F. W.; ALEXANDRE, F. F. Brazilian biomes distribution: Past and future. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, v. 585, p. e110717, Jan. 2022. DOI: <10.1016/j.palaeo.2021.110717>. Disponível em: <doi:10.1016/j.palaeo.2021.110717>.

MARTINEZ-VILALTA, J., SALA, A., ASENSIO, D., GALIANO, L., HOCH, G., PALACIO, S., PIPER, F., FRANCISCO, L. Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: A global synthesis. *Ecological Monographs*. 86. 10.1002/ecm.1231. 2016.

MOLLE, F.R.D.; BRANDÃO, A.D.; TINÉ, M.A.S. Variação ao longo do dia da atividade de enzimas do catabolismo de sacarose em plântulas de *Hymenaea courbaril* L. durante a mobilização do xiloglucano de reserva. *Brazilian Journal of Botany*. 2009.

NGUGI, M. R.; HUNT, D. D.; DOLEY, D.; RYAN, P.; DART, P. Selection of species and provenances for low-rainfall areas: physiological responses of *Eucalyptus cloeziana* an *Eucalyptus argophloia* to seasonal conditions in subtropical Queensland. **Forest Ecology and Management**, v. 193, p. 141-156, 2004.

NÓIA JÚNIOR, R. DE S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; FONSECA, M. D. S.; SILVA, A. P. C.; XAVIER, T. M. T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in *Eucalyptus*. **Journal of Forestry Research**, 27 mar. 2020. doi:10.1007/s11676-019-00926-9

OLIVIER, J.G.J. and PETERS, J.A.H.W. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, 2020.

OSAKABE, Y.; OKASABE, K.; SHINOZAKI, K.; TRAN, L.P. Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**. Tsukuba v. 5, n. 86, 2014.

PBMC - Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas. Capítulo 9: Mudanças ambientais de curto e longo prazo: projeções, reversibilidade e atribuição. In: Base científica das mudanças climáticas. Contribuição do Grupo de Trabalho 1 do Painel Brasileiro de Mudanças Climáticas ao Primeiro Relatório da Avaliação Nacional sobre Mudanças Climáticas [Ambrizzi, T., Araujo, M. (eds.)]. COPPE. Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil, 464 pp. 2014.

PILON, CRISTIANE; SNIDER, JOHN L; SOBOLEV, VICTOR; CHASTAIN, DARYL R; SORENSEN, RONALD B; MEEKS, CALVIN D; MASSA, ALICIA N; WALK, TRAVIS; SINGH, BHUPINDER; EARL, HUGH J. Assessing stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation under progressive drought in peanut (*Arachis hypogaea* L.). *Journal of Plant Physiology* 231: 124–134. 2018.

POORTER, L.; MCDONALD, I.; ALARCÓN, A.; FICHTLER, E.; LICONA, J.; PEÑA-CLAROS, M.; STERCK, F.; VILLEGAS, Z.; SASS-KLAASEN, U. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. *New Phytologist*, v. 185, p. 481-492, 2010.

ROSSATO, D.R.; KOLB, R.M. *Gochnatia polymorpha* (Less.) Cabrera (Asteraceae) changes in leaf structure due to differences in light and edaphic conditions. **Acta Botanica Brasilica**, v. 24, n. 3, p. 605-612, 2010.

SAGE, R. How terrestrial organisms sense, signal and respond to carbon dioxide. **Integrative and Comparative Biology**, 42:469-480., 2002.

SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, 24, 2319–2331, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972-y>.

SCHÄDEL, C.; BLÖCHL, A.; RICHTER, A.; HOCH, G. Quantification and monosaccharide composition of hemicelluloses from different plant functional types. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2010.

SERRANO AL, GOLÇALVES RS, GONÇALVES AO (2013) Avaliação do impacto de políticas públicas federais no processo de desmatamento na Amazônia. *Revista de Administração e Negócios da Amazônia*, 5(1):1-19.

SOUZA, A.; MORAES, M.G.; FIGUEIREDO-RIBEIRO, R.C.L. Gramíneas do cerrado: carboidratos não-estruturais e aspectos ecofisiológicos. *Acta Botanica Brasilica*, v. 19, n. 1, p. 81-90, 2005.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, p. 888, 2017.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I.; MURPHY, A. *Fisiologia e desenvolvimento vegetal*. 6.ed. Porto Alegre: Artmed, p. 888, 2017.

VAN VUUREN DETLEF P.; JAE EDMONDS; MIKIKO KAINUMA; KEYWAN RIAHI; ALLISON THOMSON ;KATHY HIBBARD; GEORGE C. HURTT; TOM KRAM; VOLKER KREY; JEAN-FRANCOIS LAMARQUE; TOSHIHIKO MASUI; MALTE MEINSHAUSEN; NEBOJSA NAKICENOVIC; STEVEN J. SMITH; STEVEN K. ROSE. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change**, 109:5–31, 2011.

WAGNER, F.; ROSSI, V.; STAHL, C.; BONAL, D.; HERAULT, B. Water availability is the main climate driver of neotropical tree growth. **Plos One**, v. 7, n. 4, 2012. [doi:10.1371/journal.pone.0034074](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0034074)

WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.9, p.1564-1571, set, 2015.

WERNER, E. T. Calogênese de pau-brasil (*Caesalpinia echinata* Lam-fabaceae) in-vitro visando a obtenção de um banco de germoplasma. **Dissertação** (Mestrado em Biologia Vegetal), Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

WOLF, S.; GREINER, S. Growth control by cell wall pectins. *Protoplasma*, 249, 169–175, 2012.

YAMORI, W., HIKOSAKA, K., WAY, D.A. Temperature response of photosynthesis in C₃, C₄, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynth. Res.** 119, 101–117, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>.

ZANGALINA, S.I.; FRITSCHI, F.B.; MITTLER, R. Global Warming, Climate Change, and Environmental Pollution: Recipe for a Multifactorial Stress Combination Disaster. **Trends in Plant Science**, June, Vol. 26, No. 6, 2021.

ZLATEV, Z.; CEBOLA LIDON, F. An overview on drought induced changes in plant growth, water relations and photosynthesis. Emir. **J. Food Agric.** 24, 57–72, 2012.

6. MATERIAL E MÉTODOS

6.1. Local do estudo

O experimento foi realizado em casas de vegetação (Van der Hoeven[®]) da área experimental do Laboratório de Ecofisiologia e Meteorologia Florestal, Universidade Federal do Espírito Santo, localizado em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo, Brasil (20°47'25" S e 41°23'48" W, altitude de 120 metros) (Fig. 2).

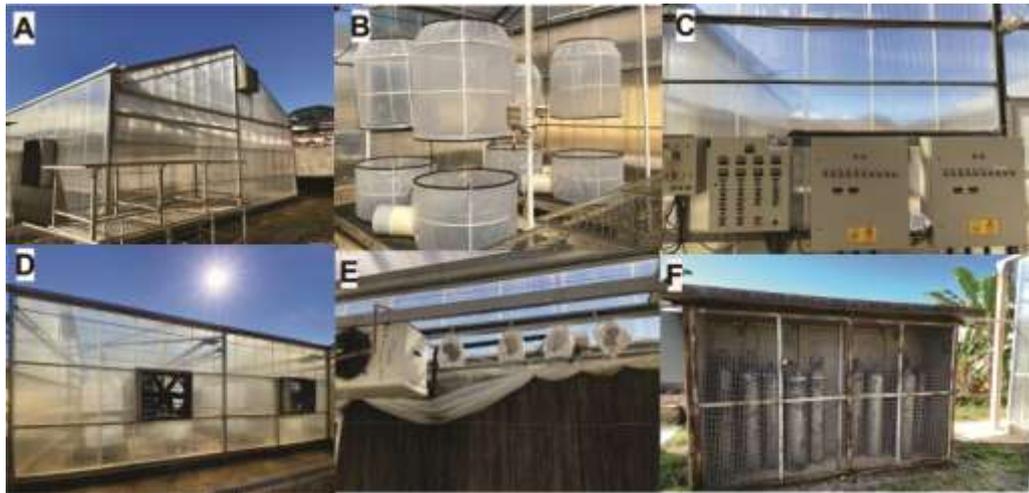


Figura 1. Estrutura das casas de vegetação localizadas no Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro-ES: (A) área externa, (B) câmaras de topo aberto, (C) painel de controle, (D) pad cooling, (E) ventiladores e aquecedores e (F) sistema de pressão de CO₂ (cilindro 25 kg)

6.2. Material vegetal

Foram utilizadas mudas com 1 ano de idade dos ecotipos folha pequena (tolerante a sombra) e folha média (tolerante ao sol) de *P. echinata* (Fig. 1). As plantas foram produzidas de forma seminal no viveiro da Reserva Natural Vale em Sooretama, Espírito Santo (ES), região sudeste do Brasil (19°06'54" S e 39°56'20" O, altitude de 49 metros). As sementes foram semeadas diretamente em sacos plásticos (10x20cm) contendo composto orgânico + solo + areia (2:1:1) e mantidas sob telado de nylon 50% de sombreamento. As sementes foram coletadas de matrizes adultas ocorrentes na mesma reserva.

As mudas foram transportadas para o Laboratório de Ecofisiologia e Meteorologia Florestal (LMEF/UFES) localizado em Jerônimo Monteiro, Espírito Santo e transplantadas para vasos de polietileno (12-L) contendo substrato comercial (Vivatto Slim Plus 20, composto por casca de pinus bioestabilizada, vermiculita, moinha de carvão vegetal, água e espuma fenólica).

Os vasos contendo as mudas foram fertilizados com 4 g L⁻¹ de adubo de liberação controlada (NPK 15-08-12, Basacote Plus 6M) com os nutrientes: nitrogênio (15%), fósforo (8%), potássio (12%), magnésio (1.2%), enxofre (4%), ferro (0.4%), boro (0.02%), zinco (0.02%), cobre (0.05%), manganês (0.06%) e molibdênio (0.015%).

As condições climáticas da ocorrência do *P. echinata* no norte do Espírito Santo (ES) foram simuladas em casa de vegetação automatizadas (temperatura e umidade do ar). Para a aclimação das mudas, as mesmas permaneceram sob condições semelhantes á natural por 30 dias, onde receberam irrigação a cada dois dias. Posteriormente as mudas foram distribuídas aleatoriamente para câmaras de topo aberto (OTC's) de cada cenário climáticos estudado.

Foram utilizadas OTC's cilíndricas (1,80 m de altura x 1,0 m de diâmetro), sendo distribuídas seis unidades por casa de vegetação. As OTC's possuem um sistema de ventilação e de injeção de CO₂ na parte inferior, responsável pela mistura do CO₂ com o ar gerando fluxo de passagem dos gases no interior das câmaras para manter uma concentração constante de CO₂ e evitar o aquecimento. Dentro de cada OTC foram distribuídas aleatoriamente seis mudas, sendo dezoito mudas de cada ecotipo, totalizando trinta e seis mudas por casa de vegetação.

6.3. Simulação dos cenários climáticos

Foram simulados três cenários climáticos mais representativos para a região norte do Espírito Santo. Para representação do atual cenário climático do bioma Mata Atlântica, foi utilizado a nomenclatura de floresta Atlântica atual (FAA).

O primeiro cenário é o controle representando o clima da floresta Atlântica atual (FAA) da região norte do Espírito Santo, onde ocorrem populações naturais dos ecotipos folhas pequenas (tolerante a sombra) e folhas médias (tolerantes ao sol) de *P. echinata*. As normais climatológicas da região foram fornecidas pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). A partir desses dados, foram projetadas curvas de variação diária de temperatura e umidade relativa do ar, considerando a [CO₂] atual de 400 ppm (Tab. 1).

Os outros dois cenários representam as projeções de mudanças climáticas Representative Concentration Pathway 4.5 (RCP 4.5) e Representative Concentration Pathway 8.5 (RCP 8.5) para o período de 2081 a 2100 previstos no Fifth Assessment Report do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC, 2013). Para os cenários

de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 a temperatura foi elevada em 2°C e 3,5°C, respectivamente, em relação a temperatura da floresta Atlântica atual (controle).

Os valores da umidade relativa do ar foram calculados utilizando os valores de pressão parcial de vapor d'água compensada das projeções RCP 4.5 e 8.5. A primeira RCP recebeu [CO₂] de 580 ppm e a segunda 936 ppm (Tab. 1).

Tabela 1. Caracterização dos cenários climáticos: floresta Atlântica atual (FAA), RCP 4.5 e 8.5

Variáveis climáticas	FAA	RCP 4.5	RCP 8.5
	Temperatura do ar (°C)		
Tmin	22,6	24,6	26,1
Tcomp	26,1	28,1	29,6
Tmax	31,3	33,3	34,8
Umidade relativa do ar (%)			
URmin	67	60	55
URcomp	82	80	74
URmax	100	93	85
Concentração atmosférica de CO ₂ (ppm)			
[CO ₂]	400	580	936

Em que: T = temperatura, UR = umidade relativa do ar, [CO₂] = concentração atmosférica de CO₂, mín = mínima, comp = compensada, máx = máxima, °C = graus Celsius, % = porcentagem, ppm = partes por milhão. Nota: Partes por milhão é uma medida física de quantas moléculas de um gás existem em relação a todas as moléculas na atmosfera. Se [CO₂] é 400 ppm, para cada milhão de moléculas no ar, 400 são moléculas de CO₂

Em cada cenário climático foram estabelecidas duas condições de umidade do solo, mantendo as plantas com 40% e 80% da capacidade máxima de retenção de água do substrato, controladas por pesagem diária dos vasos contendo as plantas e quando necessário feito a reposição da água perdida por evapotranspiração (FREIRE et al., 1980). Os níveis de umidade do substrato representam uma condição não estressante mantendo as plantas bem irrigadas (80% da capacidade máxima de retenção de água) e uma condição estressante com retenção hídrica (40% da capacidade máxima de retenção de), baseado em Amaral et al. (2021).

Foi adotado o delineamento inteiramente casualizado no esquema fatorial duplo, com nove repetições, com três cenários climáticos e dois níveis de umidade do substrato, totalizando seis tratamentos (3x2), composto por 108 unidades experimentais.

6.4 Controle microclimático

Duas estações meteorológicas automáticas compostas por três sensores conjugados de temperatura do ar e umidade relativa do ar modelo CS500 (Campbell

Scientific, Inc., Logan, UT, USA) foram instaladas no interior de cada casa de vegetação visando o monitoramento microclimático dos cenários reproduzidos nas três casas de vegetação (Tab. 2).

Os dados foram armazenados em um registrador de dados, modelo CR-10x (Campbell Scientific, Inc., Logan, UT, EUA). As leituras foram realizadas a cada 10 segundos e os valores médios armazenados em intervalos de 10 minutos. Os valores da temperatura e umidade relativa do ar de cada cenário foram programados no software Sistrad[®]. Controladores de temperatura do ar (MT-543Ri plus, Full Gauge[®]) acionaram um sistema de resfriamento com exaustão e painel evaporativo (pad cooling) no período diurno e noturno. Caso a temperatura ficasse abaixo do valor desejado, aquecedores eram acionados. Controladores de umidade do ar do (modelo AHC-80 plus, Full Gauge[®]) acionaram um sistema de nebulização de bicos tipo fogger, para evitar que a umidade relativa do ar não ficasse abaixo do valor desejado.

A radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foi monitorada em um sensor QUANTUM (Li-Cor Inc, Lincoln, Nebraska, USA) (Fig. 3). A variação do déficit de pressão do vapor do ar (DPV) foi calculada pela diferença dos valores de pressão de saturação de vapor d'água (e_s) e pressão parcial de vapor d'água (e_a) de cada cenário climático (PEREIRA et al., 2002):

$$DPV = e_s - e_a \quad (1)$$

$$e_s = 0,6108 * 10^{7,5 * T_{ar}/237,3 + T_{ar}} \quad (2)$$

$$e_a = UR_{ar} * \frac{e_s}{100} \quad (3)$$

Em que: T_{ar} = temperatura do ar (°C) e UR_{ar} = umidade relativa do ar (%). e_s = pressão de saturação (kPa); e_a = pressão parcial de vapor (kPa).

No cenário climático atual ou controle (FAA), não foi fornecido CO_2 pelo sistema de injeção de CO_2 , sendo mantida a $[CO_2]$ natural. Já nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, a $[CO_2]$ nas OTC's foi fornecida diariamente via sistema de injeção de gases das 8h00min até 16h00min (horário local). Além disso, foi realizado o monitoramento da concentração de CO_2 dentro de cada OTC às 12h30min (hora local) através de um analisador de CO_2 (Sensor Testo, modelo 535, Lenzkirch, Baden-Württemberg, GER) durante a condução do experimento (Fig. 3).

Tabela 2. Caracterização microclimática dos cenários climáticos simulado em casas de vegetação com controle de temperatura e umidade relativa durante o experimento

Variáveis climáticas	FAA	RCP 4.5	RCP 8.5
	Temperatura do ar (°C)		
T_{min}	24,3	25,4	26,7
T_{med}	25,8	27,7	29,4

T_{\max}	26,4	28,5	29,7
Umidade relativa do ar (%)			
UR_{\min}	72	48	44
UR_{med}	83	62	61
UR_{\max}	95	82	77
Déficit de pressão de vapor do ar (KPa)			
DPV_{\min}	0,16	0,60	0,80
DPV_{med}	0,55	1,42	1,59
DPV_{\max}	0,92	1,92	2,26
Concentração atmosférica de CO ₂ (ppm)			
$[CO_2]_{\min}$	374	532	912
$[CO_2]_{\text{med}}$	399	566	930
$[CO_2]_{\max}$	411	602	965

T_{med} temperatura do ar média, T_{\min} temperatura do ar mínima, T_{\max} temperatura do ar máxima, VPD_{med} déficit de pressão de vapor médio, VPD_{\min} déficit de pressão de vapor mínimo, VPD_{\max} déficit de pressão de vapor máximo, UR_{med} umidade relativa média, UR_{\min} umidade relativa mínima, UR_{\max} umidade relativa máxima, $[CO_2]_{\text{med}}$ concentração atmosférica de CO₂ média, $[CO_2]_{\min}$ concentração atmosférica de CO₂ mínima, $[CO_2]_{\max}$ concentração atmosférica de CO₂ máxima

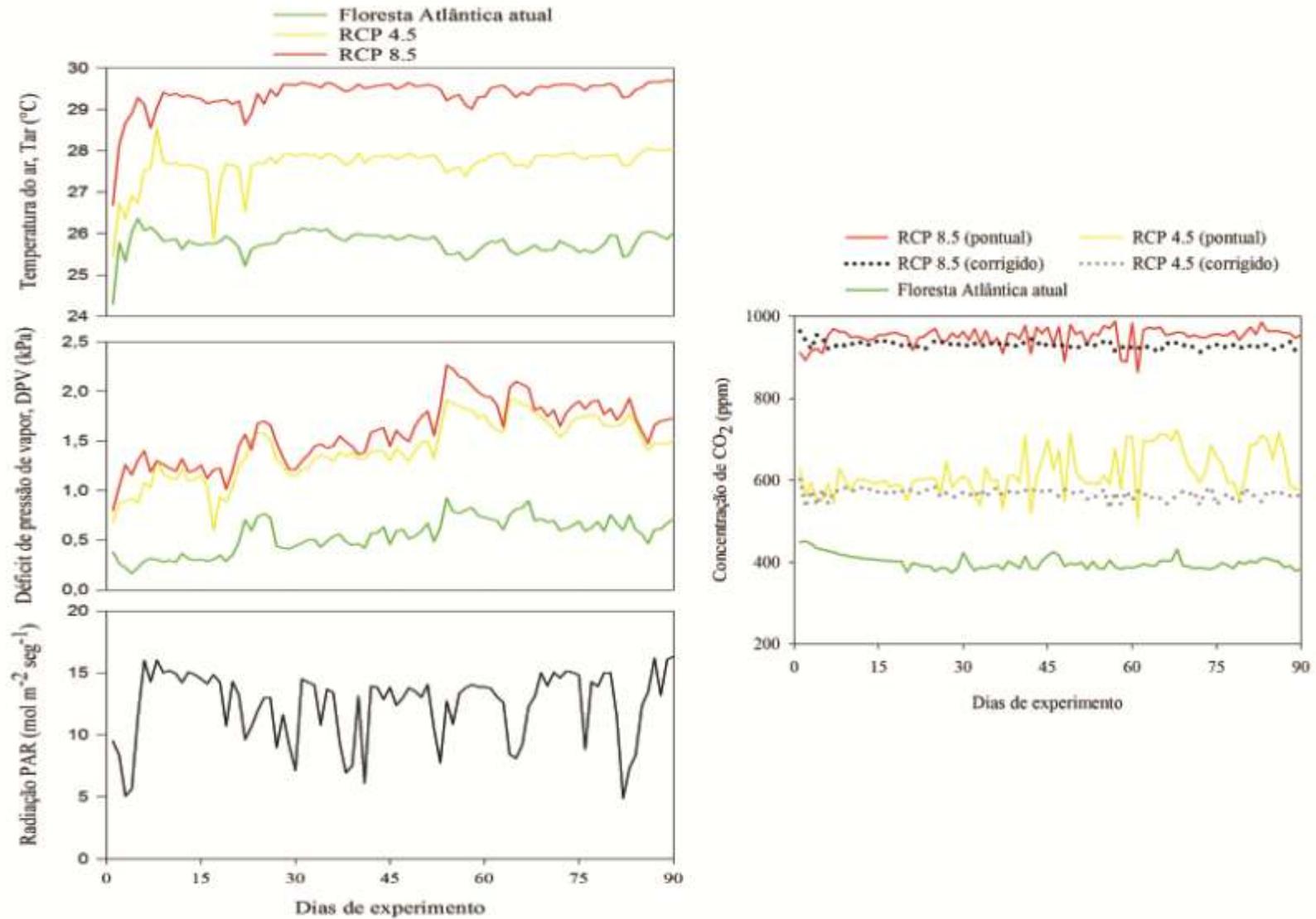


Figura 3. Curso diário da temperatura do ar, T_{ar} (°C), déficit de pressão de vapor, DPV (Kpa), radiação fotossinteticamente ativa, PAR ($\text{mol.m}^{-2}.\text{seg}^{-1}$) e concentração atmosférica de CO_2 , $[\text{CO}_2]$ (ppm) nos cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) durante 90 dias de duração do experimento

6.4. Medidas de crescimento

Ao final do experimento (90 dias) foram realizadas medições de altura das plantas, com auxílio de uma régua milimetrada (0.1 cm de precisão); diâmetro do caule, com um paquímetro digital (precisão 0.01 mm), área foliar (cm^2), medida com um integrador de área foliar modelo LI-3100 (Li-Cor Inc, Lincoln, Nebraska, USA); e contagem do número total de folhas, folíolos e foliólulos.

Posteriormente as plantas foram seccionadas em caules, folhas e raízes e acondicionados, separadamente, em sacos de papel e acomodados em estufa de circulação de ar forçada para secagem a 65°C por 72 horas, de acordo com Gama et al. (2020). Posteriormente, os órgãos das plantas foram pesados em balança analítica (precisão de 0.0001 g) para obtenção da massa seca (MST = massa seca total, MSF = massa seca de folhas, MSC = massa seca de caules, MSR = massa seca de raízes).

Vale ressaltar que foram obtidas os valores de massa seca total das plantas no antes do início do experimento (tempo 1) e no final (tempo 2). Foi realizado o mesmo procedimento com a área foliar. Com esses dados, foram calculadas a taxa de crescimento relativo (TCR, $\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{dia}^{-1}$) e a taxa assimilatória líquida (TAL, $\text{mg}\cdot\text{cm}^{-2}\cdot\text{dia}^{-1}$) segundo Hunt (1982):

$$\text{TCR} = \frac{\text{Ln}(m_2) - \text{Ln}(m_1)}{t_2 - t_1} \quad (4)$$

Em que: Ln = logaritmo neperiano; m = massa seca da planta; $t_2 - t_1$ = intervalo de tempo entre as coletas 1 e 2

$$\text{TAL} = \frac{(m_2 - m_1)}{(t_2 - t_1)} \frac{(\text{Ln}(AF_2) - \text{Ln}(AF_1))}{(AF_2 - AF_1)} \quad (5)$$

Em que: onde m é a massa seca total das plantas e AF a área foliar. Os subscritos 1 e 2 referem-se a duas coletas consecutivas.

Com os valores das medidas de crescimento, foram calculados a relação raiz e parte aérea (R:PA= massa seca da raiz/massa seca da parte aérea constituída pelo somatório da massa de folhas e caule, $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$), área foliar específica (AFE = área foliar total/massa seca foliar total, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$), área foliar unitária (AFU = área foliar total/número de foliólulos, cm^2), razão de área foliar (RAF = área foliar total/massa seca total, $\text{cm}^2\cdot\text{g}^{-1}$), segundo Hunt (1982).

6.5. Trocas gasosas

As trocas gasosas foram analisadas ao final do experimento usando um analisador de gás infravermelho portátil (IRGA, modelo Li COR 6400, LI-COR Inc., Lincoln, NE, EUA) acoplado a câmara de medição de 6 cm². As medições foram realizadas em dias de céu limpo em folhas saudáveis totalmente expandidas do terço superior de todas as plantas do experimento. As leituras foram realizadas de forma aleatória, utilizando fonte de luz artificial (LI-6400-02B) com intensidade de 500, 650, 800 e 900 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ às 8:00, 9:00, 10:00 e 11:00 horas, respectivamente.

As variáveis analisadas foram: taxa de assimilação líquida de CO₂ (A , $\mu\text{mol CO}_2\text{.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$), condutância estomática (g_s , $\text{mol H}_2\text{O.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$), transpiração (E , $\text{mmol H}_2\text{O.m}^{-2}\text{.s}^{-1}$), concentração intercelular de CO₂ (C_i , $\mu\text{mol CO}_2\text{.mol ar}^{-1}$), eficiência instantânea de carboxilação (A/C_i , $\mu\text{mol CO}_2\text{.m}^{-2}\text{.s}^{-1}\text{.Pa}^{-1}$) e eficiência do uso da água ($EUA = A/E$, $\mu\text{mol CO}_2\text{.mol H}_2\text{O}^{-1}$). As concentrações de CO₂ utilizadas nas análises de trocas gasosas foram de 400, 580 e 936 ppm em FAA, RCP 4.5 e 8.5, respectivamente.

6.6. Potencial hídrico foliar

As medições do potencial hídrico foliar (Ψ_w , MPa) aconteceram no período de antemã, entre 4:00 e 5:00 horas (hora local), utilizando uma câmara de pressão Scholander modelo 1505D-EXP (PMS Instrument Company, Albany, OR, USA). As leituras foram realizadas em folhas maduras saudáveis totalmente expandidas do terço superior de todas as mudas de cada tratamento (SCHOLANDER et al., 1965).

6.7. Crop water stress index

O Crop water stress index (CWSI) foi calculado seguindo a equação proposta por Idso (1982):

$$\text{CWSI} = \frac{(T_{\text{leaf}} - T_{\text{wet}})}{(T_{\text{dry}} - T_{\text{wet}})} \quad (6)$$

Em que: T_{leaf} é a temperatura média da folha em condição ambiente, T_{wet} é a temperatura de uma folha saturada (pulverizada com água cinco minutos antes da leitura) e T_{dry} é a temperatura de uma folha na ausência de fluxo de água, sob condições não transpirantes. As folhas foram revestidas com vaselina para fechamento estomático.

As imagens térmicas foram obtidas em câmera termográfica modelo FLIR T430sc (FLIR Systems, Wilsonville, OR, USA), resolução de 320 × 240 pixels, em três horários (hora local): às 10:00 am, por ser um momento em que as plantas se encontram em elevada atividade fotossintética; às 12:00 pm, por ser o horário de maior intensidade da irradância solar; e às 15:00 pm, por ser o horário que ocorre o fechamento estomático

e a mais baixa atividade fotossintética das plantas dos ecotipos de *P. echinata*. A distância entre a câmera e as plantas foi ajustada em 0,4 m e emissividade utilizada foi de 0,96, como sugerido por Amaral et al. (2021). As imagens foram processadas através do software FLIR tools, realizando-se cinco amostragens por folha de cada repetição dos tratamentos para obtenção da média da temperatura.

6.8. Fluorescência transiente da clorofila *a*

O transiente da fluorescência (OJIP) foi determinado em fluorômetro digital portátil modelo FluorPen FP 100 (Photon Systems Instruments, Brno, Czech Republic) que forneceu a cinética da fluorescência de acordo com as fases O (50 μ s), J (2 ms), I (30 ms) e P (500 ms a 1 s). As medições foram realizadas entre 7:00 e 8:00 hora da manhã (hora local), em cinco plantas por tratamento ($n = 5$), utilizando as mesmas folhas das análises de trocas gasosas.

As folhas foram adaptadas ao escuro por 30 minutos, utilizando pinças e pulso saturante de luz de 1.500 μ mol $m^{-2}s^{-1}$, como sugerido por Baker (2008). As intensidades de fluorescência foram registradas entre 50 μ s e 1s, onde: 50 μ s é a fluorescência inicial (F_0) e \pm 300 ms a fluorescência máxima (F_M). Os parâmetros que regulam o estágio inicial da atividade fotossintética nos centros de reação foram calculados pelo teste-JIP a partir das intensidades de fluorescência (Tab. 1) (STRASSER; STRASSER, 1995).

Tabela 3. Parâmetros dos transientes da fluorescência da clorofila calculados pelo teste-JIP

Parâmetro	Fórmula	Significado
F_0	$= F_{50\mu s}$	Intensidade da fluorescência a 50 μ s
F_j	$= F_{2ms}$	Intensidade da fluorescência na fase J
F_i	$= F_{60ms}$	Intensidade da fluorescência na fase I
F_m	$= F_p$	Intensidade de fluorescência máxima
F_v	$= F_m - F_0$	Fluorescência máxima variável
F_v/F_m		Eficiência máxima do fotossistema II
F_v/F_0		Relação máxima do rendimento quântico do PSII
M_0	$= (TR_0/RC) - (ET_0/RC)$	Taxa líquida de fechamento dos RC
V_j	$= (F_{2ms}-F_0)/(F_m-F_0)$	Fluorescência variável relativa ao nível J
V_i	$= (F_{60ms}-F_0)/(F_m-F_0)$	Fluorescência variável relativa ao nível I
PI_{abs}	$= (RC/ABS).(TR_0/DI_0).(ET_0/1-ET_0)$	Índice de desempenho potencial do PSII
Fluxo por Centro de Reação		
ABS/RC	$= M_0.(1/V_j).(1/TR_0/ABS)$	Fótons absorvidos por RC
TR_0/RC	$= M_0.(1/V_j)$	Taxa pela qual um excíton é capturado

$$\frac{ET_0/RC}{DI_0/RC} = \frac{M_0 \cdot (1/V_j) \cdot ET_0/TR_0}{(ABS/RC) - (TR_0/RC)}$$

pelo RC
Transporte de e⁻ por RC
Fluxo de energia dissipada por RC ativo

ABS: Fluxo de fótons absorvidos pela clorofila do complexo antena; TR₀: Fluxo de energia capturado para o centro de reação; ET₀: Transporte de elétrons; RC: Centro de reação; DI₀: Energia dissipada; CS₀: Seção transversal excitada; Índice 0 significa tempo zero (início da excitação)

6.9. Carboidratos

6.9.1. Preparo das amostras para análises de carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular

Amostras de 10 g de folhas, caules e raízes foram aquecidas em microondas para inativação enzimática (600w/90 segundos) (POPP et al., 1996) e posteriormente secas em estufa de circulação forçada de ar a 65°C por 5 dias, e posteriormente pulverizadas em moinho de bola (modelo TE-350, TECNAL, São Paulo, Brasil) e armazenadas em temperatura ambiente.

6.9.2. Carboidratos não estruturais (açúcares solúveis e amido)

Para a extração dos açúcares solúveis 10 mg das amostras foram pesados em balança analítica de precisão (AB204-S/FACT Mettler Toledo, Leicester, Inglaterra) em microtubos de 2 mL e submetidos a quatro extrações subsequentes com 1,5 mL de etanol 80% em banho-maria a ±80°C durante 20 minutos e centrifugados a 13.000 rpm (rotações por minuto) por 10 minutos (POLLOCK, 1996). A etapa anterior foi repetida por mais três vezes, o precipitado foi recolhido e transferido para estufa 50°C durante 24 horas, para completa evaporação do etanol e armazenado em temperatura ambiente. Após isso, foi realizado a extração de amido e os carboidratos solúveis foram ressuspensos em água ultrapura e determinados por cromatografia líquida de alto desempenho (HPLC, High Performance Liquid Chromatography) no cromatógrafo da Shimadzu (modelo SIL-10AF, Kyoto, Japão) com coluna Shim-Pack® SPR-Pb (250x7,8mm, fluxo = 0,6mL/min, temperatura = 80°C) eluído com acetonitrila e água ultrapura, usando padrões Sigma®.

6.9.3. Amido

A determinação do amido foi realizada pelo método enzimático descrito por Amaral et al. (2007). Foram pesados 10 mg de amostras de folha, caule e raiz. Os açúcares solúveis foram removidos seguindo o protocolo de Pollock (1996) descrito no item acima. Após a remoção dos açúcares, foram adicionados ao precipitado 0,5 mL (120 U mL⁻¹) de α-amilase termoestável de *Bacillus licheniformis* (cód. E-ANAAM,

MEGAZYME), diluída em tampão MOPS 10 mM em pH 6,5. As amostras foram incubadas a 75°C por 30 minutos. Posteriormente, as amostras foram resfriadas até 50 °C, e adicionado 0,5 mL de uma solução contendo 30 U mL⁻¹ de amiloglucosidase de *Aspergillus niger* (cód. EAMGPU, MEGAZYME) em tampão acetato de sódio 100 mM em pH 4,5.

A dosagem do amido foi realizada pela quantificação de glicose liberada no processo de hidrólise do amido. Foram utilizados 50 µL do extrato com 250 µL do reagente Glicose PAP Liquiform (CENTERLAB, Brasil), contendo as enzimas glicose-oxidase (~11.000 U mL⁻¹) e peroxidase (~700 U mL⁻¹), 290 µmol L⁻¹ de 4-aminoantipirina e 50 mM de fenol pH 7,5. Nessa etapa, a glicose oxidase catalisa a oxidação da glicose. As amostras foram incubadas a 50 °C por 30 minutos por duas vezes e montadas em placas específicas para leitura em espectrofotômetro acoplado ao leitor ELISA (Thermo Scientific Express Multiskan FC Microplate Photometer, Massachusetts, EUA) em comprimento de onda de 490 nm. Para a elaboração da curva padrão foi utilizada solução de glicose (SIGMA), nas concentrações de 0; 2,5; 5; 7,5 e 10 mg/mL.

6.10. Polímeros de parede celular

6.10.1. Lignina

A determinação de lignina foi realizada segundo Dos Santos et al. (2008). Foram pesados 150 mg de amostras pulverizadas em tubos Falcon e homogeneizado em 10 mL de tampão fosfato de sódio e potássio 50 mM em pH 7. As amostras foram transferidas para tubos Falcon de 15 mL e o material foi centrifugado por 10 minutos a 6.000 rpm e o sobrenadante descartado. A partir dessa etapa o precipitado passou por 12 lavagens com diferentes soluções seguindo o mesmo procedimento: a solução foi adicionada, o material foi agitado em Vórtex por 5 minutos e o sobrenadante foi descartado.

Após a 12^a lavagem, o precipitado foi seco em estufa a 60 °C por 24 horas. Esse material resultante é o que compreende a fração de parede celular livre de proteínas. Do precipitado seco, foi pesado 50 mg em tubos de 15 mL e adicionado 1,2 mL de ácido tioglicólico e 6 mL de HCl 2 M. As amostras foram incubadas a 95°C por 4 horas. Após esse tempo elas foram centrifugadas por 15 minutos e lavadas três vezes com água destilada. Posteriormente, foram adicionados 7 mL de NaOH 0,5 M e incubadas a 30°C por 18 horas sob agitação constante em agitador magnético.

Posteriormente as amostras foram centrifugadas para reservar o sobrenadante e em seguida, o precipitado foi lavado com 3 mL de NaOH 0,5 M e centrifugado. O sobrenadante resultante foi unido ao anterior, acidificado com 1,8 mL de HCl e mantido a 4 °C por 12 horas sem agitar. Após esse período, as amostras foram centrifugadas e lavadas duas vezes com água destilada, centrifugadas novamente em 6.000 rpm por 10 minutos em temperatura ambiente e descartado o sobrenadante. O precipitado obtido foi seco a 60°C por 24 horas e ressuspendido em 1 mL NaOH 0,5 M.

A determinação do teor de lignina foi realizada em espectrofotômetro no comprimento de onda de 280 nm. Foi utilizada a solução de lignina (Sigma®) para projeção da curva padrão, nas concentrações de 0; 10; 20; 30; 40; 50; 100; 200; 300; 400 e 500 µg/µL. Os resultados da concentração de lignina foram expressos em mg lignina g⁻¹ MS.

6.10.2. Celulose

A determinação de celulose seguiu o protocolo de Brendel et al. (2000). Foram pesadas 100 mg de amostras pulverizadas em tubos Falcon com tampa rosqueada e adicionado 2 mL de ácido acético 80% e 200 µL de ácido nítrico 69% concentrado. Os tubos foram fechados, as amostras misturadas com cuidado, e acentados em placa aquecedora por 1 hora a 100°C. Após esfriarem, as amostras foram transferidas para tubos Falcon de 15 mL, previamente pesados onde se adicionou 2,5 mL de etanol 99%.

As amostras foram homogeneizadas em agitador Vórtex, centrifugadas a 4.500 rpm por 5 minutos em temperatura ambiente e o sobrenadante descartado. Em seguida, as amostras foram lavadas sequencialmente da seguinte forma: (1) 5 mL de etanol 99% para remover os produtos degradados na extração; (2) 5 mL de água deionizada para remover os vestígios do ácido nítrico; (3) 5 mL de NaOH 17% que ficou em repouso em temperatura ambiente por 10 minutos; (4) 5 mL de água deionizada; (5) 2,2 mL de água deionizada e 600 µL de ácido acético.

Posteriormente, foi adicionado 2,2 mL de água deionizada para eliminação de material não celulósico persistente e (6) 5 mL de água deionizada. Entre cada lavagem (1 a 6), as amostras foram centrifugadas a 4.500 rpm por 5 minutos em temperatura ambiente e os sobrenadantes descartados. Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 50 °C por 48 horas e pesadas para determinação da concentração de celulose. Os resultados da concentração de celulose foram expressos em miligrama de celulose por grama de massa seca (mg celulose g⁻¹ MS).

6.10.3. Hemicelulose

A metodologia utilizada para a determinação de hemicelulose foi a de Shädel et al. (2010) com modificações. Para cada 50 mg de massa seca das amostras pulverizadas, foi adicionado 1,5 mL de etanol 80% em microtubos de 2 mL, para eliminação dos açúcares solúveis. Os tubos foram levados ao banho-maria a ± 80 °C por 20 minutos.

As amostras foram centrifugadas em 13.000 rpm por 5 minutos a temperatura de 5 °C e o sobrenadante descartado cuidadosamente. Esta operação foi repetida por mais três vezes para eliminação total dos resíduos de açúcares solúveis ainda presentes nas amostras.

O precipitado foi seco em estufa a 50 °C durante 24 horas e então pesado. Ao precipitado seco, foram adicionados 1,5 mL de dimetil sulfóxido (DMSO) para extração do amido presente nas amostras, sendo mantido sob agitação em placa agitadora por 24 horas em temperatura ambiente. Após esse período, as amostras foram centrifugadas em 13.000 rpm por 5 minutos a 5°C e o sobrenadante descartado. O precipitado foi lavado em 1,5 mL de água destilada por três vezes, centrifugado e descartado o sobrenadante.

O precipitado foi transferido para estufa a 50 °C por 24 horas e pesado no dia seguinte. Foram acrescentados 1,5 mL do detergente neutro (tetraborato de sódio decahidratado 18 mmol, ácido etilenodiaminotetracético 66 mmol, sulfato de sódio dodecil 10,4 mmol, fosfato de sódio dibásico 32 mmol e água destilada) para extração de resíduos solúveis em água e pectinas em que foram adicionados 25 μ L de solução de sulfito de sódio (10 mg/10 mL) para extração de proteínas. As amostras foram transferidas para banho-maria a ± 100 °C por 60 minutos sob agitação em placa magnética.

Posteriormente, as amostras foram centrifugadas e o sobrenadante descartado. O precipitado desta etapa (celulose, hemicelulose e lignina) foi lavado sequencialmente da seguinte forma: (1) duas vezes com 1,5 mL de água deionizada quente; (2) uma vez com 1,5 mL de acetona 100% e; (3) uma vez com 1,5 mL de água deionizada. O precipitado contendo a “fração total de parede celular” foi transferido novamente para estufa a 50 °C durante 24 horas e pesado.

O precipitado contendo apenas a “fração de celulose e lignina” foi seco em estufa a 50 °C durante 24 horas e pesados posteriormente. O cálculo para a determinação da concentração das hemiceluloses nas amostras foi realizado pela diferença gravimétrica entre a “fração total da parede celular” e a “fração de celulose e

lignina”. Os resultados da concentração de hemicelulose foram expressos em mg hemicelulose g⁻¹ MS.

6.11. Análises estatísticas

As análises estatísticas foram realizadas no software R (R CORE TEAM, 2017). Todos os dados foram submetidos a análise de variância (ANOVA) *two-way* (três cenários climáticos e dois níveis de umidade do substrato) e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$) para avaliar a interação entre cenários climáticos e umidade do substrato (BARROS; DIAS, 2009).

Foram plotados gráficos quando a interação entre os cenários climáticos e níveis de umidade do substrato foi significativa. Para avaliar as variáveis de forma integrada foi realizada análise multivariada de componentes principais. Os resultados complementares estão apresentados no material suplementar (tabelas S1, S2, S3, S4, S5, S6 e figura S1, S2).

7. RESULTADOS

7.1. Crescimento

O crescimento das plantas dos ecotipos de *P. echinata* mostrou-se positivamente responsivo aos cenários de mudanças climáticas previstos para até o final do presente século. Plantas dos dois ecotipos apresentaram maior crescimento em altura do caule e massa seca total em RCP 4.5 e 8.5 quando comparados com as plantas submetidas ao cenário climático da floresta Atlântica atual-FAA (Fig. 4).

Dentro de cada cenário, as plantas dos dois ecotipos conduzidos com 80% de umidade do substrato apresentaram maior crescimento em altura do caule (Fig. 5A; 5B) e massa seca total (Fig. 5C; 5D). Comparando os cenários RCPs, as plantas dos dois ecotipos obtiveram maior altura do caule (Fig. 5) e massa seca total (Fig. 5C; 5D) em RCP 8.5. As plantas dos dois ecotipos nos dois níveis de umidade do substrato emitiram maior número de foliólulos no cenário RCP 8.5, refletindo em maior área foliar total (Fig. 5).

As plantas dos dois ecotipos apresentaram menor número de foliólulos no cenário climático floresta Atlântica atual, e conseqüentemente, menor área foliar total, independentemente do teor de umidade do substrato (Fig. 5).

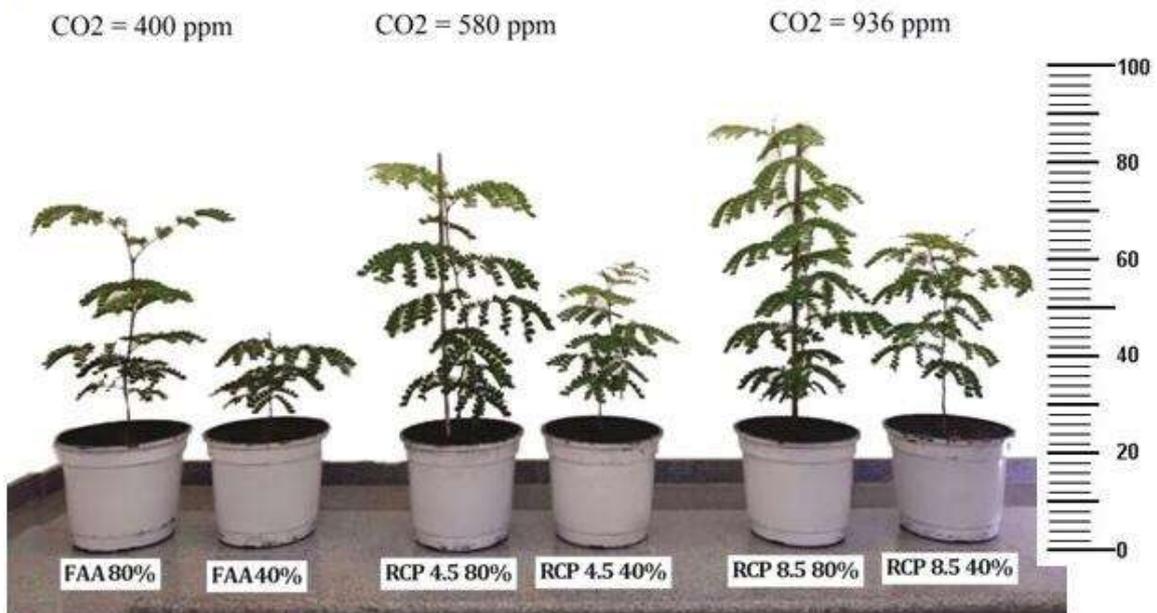
As plantas dos dois ecotipos cultivadas no cenário RCP 8.5 apresentaram maior taxa de crescimento relativo (TCR) nos dois níveis de umidade do substrato (Fig. 5I;

5J). Plantas do ecotipo tolerante a sombra (folha pequena) cultivadas em 80% de umidade do substrato, apresentaram TCR igual aos cenários RCP 4.5 e 8.5 (Fig. 5I). As plantas dos dois ecotipos submetidas ao cenário climático da FAA apresentaram menor TCR quando comparado aos cenários RCP 4.5 e 8.5 (Fig. 5I; 5J). As plantas dos dois ecotipos obtiveram maior taxa assimilatória líquida (TAL) em RCP 4.5 e 8.5 (Fig. 5K; 5L) e menor valor dessa variável no cenário climático da FAA (Fig. 5K; 5L).

Os resultados mostraram que a maioria das variáveis de crescimento dos dois ecotipos foram positivamente responsivas nos cenários RCP 4.5 e 8.5 combinado por elevada [CO₂] (Tab. 4; Tab. 5). Nesse sentido, as plantas dos dois ecotipos apresentaram maior crescimento, independentemente da umidade do substrato, como observado nas variáveis de altura, diâmetro do caule, biomassa, área foliar total (AFT), TCR e TAL (Tab. 4; Tab. 5).

Os dois ecotipos apresentaram respostas semelhantes entre os cenários climáticos estudados tratamentos, mostrando maior crescimento de altura em RCP 4.5 e 8.5. Dentro de cada cenário, as plantas dos dois ecotipos apresentaram as mesmas respostas, crescendo mais em altura em 80% de umidade no substrato em relação a 40% de umidade no substrato (Fig. 4). Além disso, não foram encontradas grandes diferenças entre as variáveis de relações da área foliar e massa seca como a RAF, AFE, AFU R:PA e as taxas de crescimento TCR e TAL (Tab. 4; Tab. 5).

ECOTIPO FOLHA PEQUENA



ECOTIPO FOLHA MÉDIA

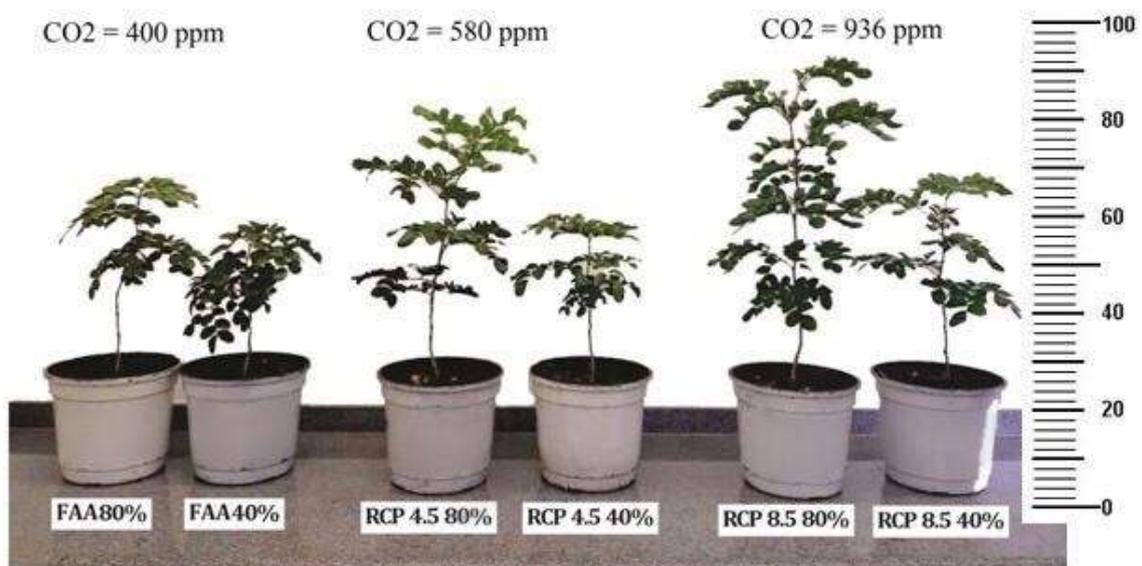


Figura 4. Aspecto morfológico das plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade máxima de retenção de água). Barra de escala em centímetros (cm)

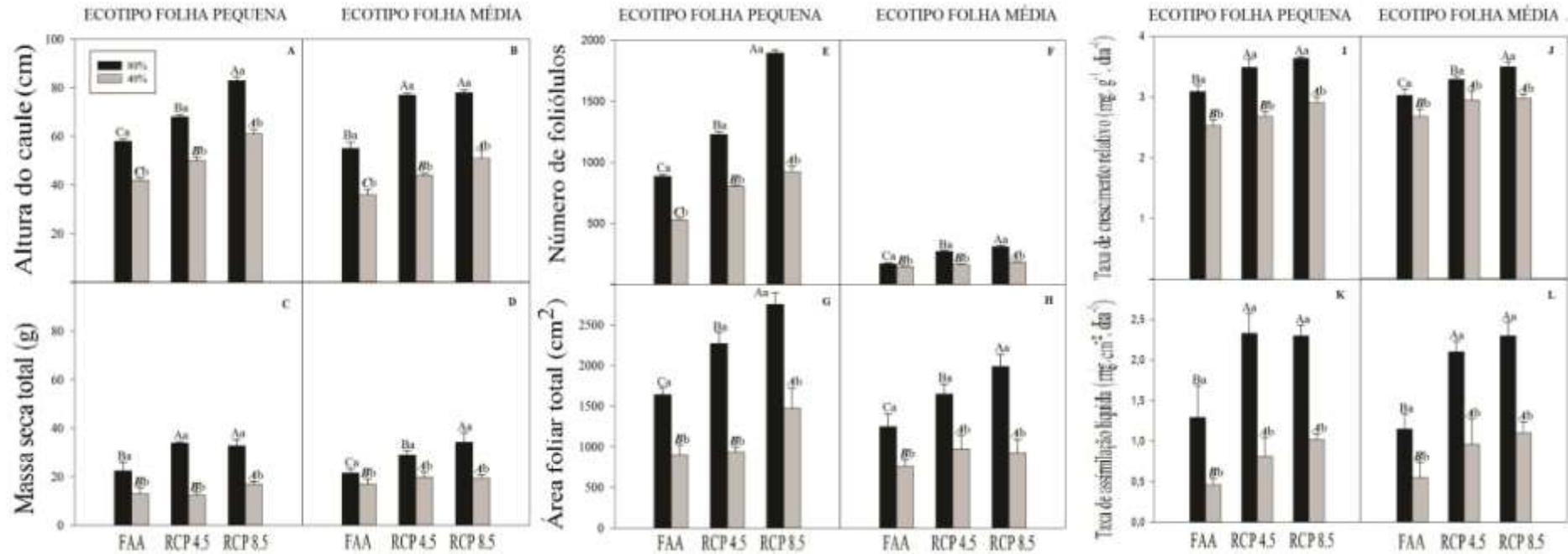


Figura 5. Medidas de crescimento das plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

Tabela 4. Medidas de crescimento das plantas do ecotipo tolerante a sombra de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Massa seca total (MST), massa seca de folha (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca de raiz (MSR), massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (R:PA), área foliar total (AFT), área foliar total/massa seca foliar total (AFE), área foliar total/número de foliólulos (AFU), área foliar total/massa seca total (RAF), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa assimilatória líquida (TAL).

Ecotipo folha pequena (tolerante a sombra)								
Variáveis	Tratamento						CV(%)	p-valor Cenário x Umidade do substrato
	Floresta Atlântica atual (80%)	Floresta Atlântica atual (40%)	RCP 4.5 (80%)	RCP 4.5 (40%)	RCP 8.5 (80%)	RCP 8.5 (40%)		
Diâmetro caule (mm)	6,76±0,09 Ba	5,45±0,14 Bb	7,96±0,26 Aa	6,54±0,14 Aa	8,17±0,45 Aa	6,96±0,16 Aa	7,80	0,4929*
Nº de folhas	9±0,31 Ba	7±0,32 Aa	11±0,87 Ba	10±0,58 Aa	15±0,57 Aa	8±0,33 Ab	9,12	0,8768*
Nº de folíolos	90±4,40 Ca	61±6,74 Bb	122±8,08 Ba	101±5,31 Ab	163±9,29 Aa	95±4,09 Ab	10,79	0,6073*
Nº de foliólulos	886±18,19 Ca	529±20,45 Cb	1230±21,1 Ba	806±6,26 Bb	1897±25,05 Aa	923±46,21 Ab	4,10	0,7773*
MST (g)	22,51±3,50 Ba	13,03±2,49 Bb	33,87±0,6 Aa	12,47±1,17 Bb	32,83±2,45 Aa	16,99±1,18 Ab	21,45	0,2560*
MSF (g)	13,75±0,46 Ba	7,47±0,89 Bb	19,74±1,25 Aa	7,47±0,51 Bb	21,12±2,25 Aa	12,11±1,79 Ab	22,43	0,1095*
MSC (g)	5,64±0,29 Ba	2,94±0,25 Bb	8,32±0,61 Aa	2,83±0,31 Bb	7,81±0,72 Aa	4,90±0,33 Ab	18,97	0,9609*
MSR (g)	3,13±0,25 Ba	2,63±0,18 Aa	5,82±0,78 Aa	2,17±0,55 Ab	3,89±0,78 ABa	2,46±0,51 Aa	37,55	0,2238*
R:PA (g.g ⁻¹)	0,16±0,011 ^{ns}	0,26±0,036	0,20±0,021	0,20±0,045	0,12±0,015	0,14±0,022	33,13	0,4214
AFT (cm ²)	1.639±87,38 Ca	899±124,40 Bb	2.266±136 Ba	934±60,92 Bb	2.748±144 Aa	1.472±248 Ab	19,67	0,1683*
AFE (cm ² .g ⁻¹)	119±3,51 ^{ns}	119±4,03	116±8,42	125±5,57	133±8,23	120±4,58	11,06	0,9561
AFU (cm ²)	1,85±0,10 Aa	1,70±0,23 Aa	1,84±0,08 Aa	1,16±0,08 Ab	1,44±0,06 Aa	1,58±0,24 Aa	21,97	0,3202*
RAF (cm ² .g ⁻¹)	73±4,08 ^{ns}	68±3,62	68±5,86	48±6,45	86±5,91	74±4,94	15,81	0,8434
TCR (mg.g ⁻¹ .dia ⁻¹)	3,09±0,02 Ba	2,53±0,09 Bb	3,49±0,07 Aa	2,48±0,08 Bb	3,44±0,1 Aa	2,91±0,13 Ab	6,88	0,7993*
TAL (mg.cm ⁻² .dia ⁻¹)	1,29±0,13 Ba	0,46±0,08 Bb	2,33±0,22 Aa	0,41±0,06 Ab	2,30±0,39 Aa	1,02±0,24 Ab	38,19	0,1098*

(1) Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, p≤0,05). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. * significativa a 5% de probabilidade e ns não significativo a 5% de probabilidade por ANOVA. Os valores representam médias ± erro padrão (n = 5)

Tabela 5. Medidas de crescimento das plantas do ecotipo tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Massa seca total (MST), massa seca de folha (MSF), massa seca do caule (MSC), massa seca de raiz (MSR), massa seca da raiz/massa seca da parte aérea (R:PA), área foliar total (AFT), área foliar total/massa seca foliar total (AFE), área foliar total/número de foliólulos (AFU), área foliar total/massa seca total (RAF), taxa de crescimento relativo (TCR), taxa assimilatória líquida (TAL).

Variáveis	Ecotipo folha média (tolerante ao sol)							p-valor Cenário x Umidade do substrato
	Tratamento							
	Floresta Atlântica atual (80%)	Floresta Atlântica atual (40%)	RCP 4.5 (80%)	RCP 4.5 (40%)	RCP 8.5 (80%)	RCP 8.5 (40%)	CV(%)	
Diâmetro caule (mm)	9,21±0,21 Aa	6,96±0,05 Ab	10,14±0,24 Aa	7,71±0,31 Ab	10,55±1,15 Aa	8,76±0,34 Aa	6,52	0,9239*
Nº de folhas	5±0,31 Ba	4±0,33 Aa	6±0,35 Ba	5±0,34 Aa	12±0,57 Aa	6±0,88 Ab	17,68	0,9338*
Nº de foliólulos	32±1,73 Ba	38±3,78 Aa	63±7,66 Aa	29±4,5 Ab	46±4,16 Ba	34±1,15 Aa	18,78	0,1343*
Nº de foliólulos	170±8,29 Ca	148±2,65 Bb	273±7,07 Ba	163±3,55 Ab	310±8,20 Aa	185±3,86 Ab	7,90	0,0044*
MST (g)	21,61±1,70 Ca	17,06±1,94 Bb	28,91±2 Ba	19,85±2,17 Ab	34,26±3,93 Aa	19,48±1,27 Ab	22,43	0,8002*
MSF (g)	11,12±1,42 Ca	7,83±1,03 Ab	15,44±1,96 Ba	8,89±1,05 Ab	18,72±1,32 Aa	8,40±1,36 Ab	26,60	0,2062*
MSC (g)	6,61±0,57 Ba	4,40±0,56 Ab	6,98±1,11 Ba	5,31±0,97 Ab	10,19±0,31 Aa	4,85±0,39 Ab	25,07	0,6626*
MSR (g)	3,88±0,43 Ba	4,83±0,88 Aa	6,49±1,05 Aa	5,65±0,71 Aa	5,35±0,25 Ba	3,74±0,53 Bb	31,44	0,1736*
R:PA (g g ⁻¹)	0,23±0,040 ^{ns}	0,40±0,068	0,28±0,02	0,40±0,055	0,18±0,004	0,28±0,033	31,59	0,6139
AFT (cm ²)	1.246±154,22 Ca	760±83,41 Bb	1.646±124 Ba	971±171,30 Ab	1.986±148 Aa	923±161 Ab	25,56	0,2149*
AFE (cm ² .g ⁻¹)	112±4,16 ^{ns}	99±6,41	115 ±21,73	106±6,86	106±5,46	108±5,60	21,32	0,0008
AFU (cm ²)	7,31±0,84 Aa	5,31±0,79 Ab	6,03±0,43 Ba	5,89±0,96 Aa	6,48±0,61 Ba	4,96±0,83 Aa	28,69	0,2102*
RAF (cm ² .g ⁻¹)	57±3,38 ^{ns}	45±3,31	63±13,17	77±6,99	58±2,34	53±5,63	28,32	0,0035
TCR (mg.g ⁻¹ .dia ⁻¹)	3,03±0,08 Ca	2,78±0,12 Bb	3,29±0,1 Ba	2,95±0,06 Ab	3,50±0,05 Aa	2,78±0,10 Ab	7,58	0,7387*
TAL (mg.cm ⁻² .dia ⁻¹)	1,15±0,16 Ba	0,75±0,18 Aa	1,79±0,3 Aa	0,96±0,13 Ab	2,30±0,12 Aa	0,75± 0,18 Ab	34,15	0,6501*

(1) Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, p≤0,05). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. * significativa a 5% de probabilidade e ns não significativo a 5% de probabilidade por ANOVA. Os valores representam médias ± erro padrão (n = 5)

7.2. Trocas gasosas

O aumento da $[CO_2]$ melhorou a eficiência fotossintética das plantas, independentemente da umidade do substrato (Fig. 6). No cenário RCP 8.5, as plantas dos dois ecotipos apresentaram os maiores valores de A (Fig. 6A; 6B). As plantas do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra), apresentaram menores valores de g_s nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5 (Fig. 6C). Plantas do ecotipo folha média (tolerante ao sol) conduzidas em substrato com 80% de umidade apresentaram menores valores de g_s nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5. Em 40% de umidade do substrato, as plantas desse ecotipo apresentaram maior g_s no cenário RCP 4.5 (Fig. 6D).

Quanto à E , as plantas do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) cultivadas no cenário climático da FAA apresentaram os maiores valores, por outro lado, nos cenários RCP 4.5 e 8.5 foram observados os menores valores (Fig. 6E). A E das plantas do ecotipo folha média (tolerante ao sol) cultivadas no cenário climático da FAA e RCP 8.5 não variou entre esses cenários climáticos (Fig. 6F).

A C_i nas plantas dos dois ecotipos foi maior no cenário RCP 8.5, independentemente da umidade do substrato (Fig. 6G; 6H). As plantas dos dois ecotipos cultivadas no cenário climático da FAA apresentaram os menores valores de C_i (Fig. 8A; 8B).

Em relação a eficiência de carboxilação (A/C_i), as plantas do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) quando cultivadas em 80% de umidade do substrato apresentaram maior A/C_i no cenário RCP 8.5 enquanto as plantas conduzidas em substrato com 40% de umidade apresentaram maior A/C_i no cenário RCP 4.5 (Fig. 6I). As plantas do ecotipo folha média (tolerante a sombra) cultivadas em 40% de umidade do substrato apresentaram maior A/C_i no cenário RCP 8.5 (Fig. 6J). A EUA das plantas dos dois ecotipos foi maior no cenário RCP 8.5 quando comparado com o cenário climático da FAA, independentemente da umidade no substrato (Fig. 6K; 6L).

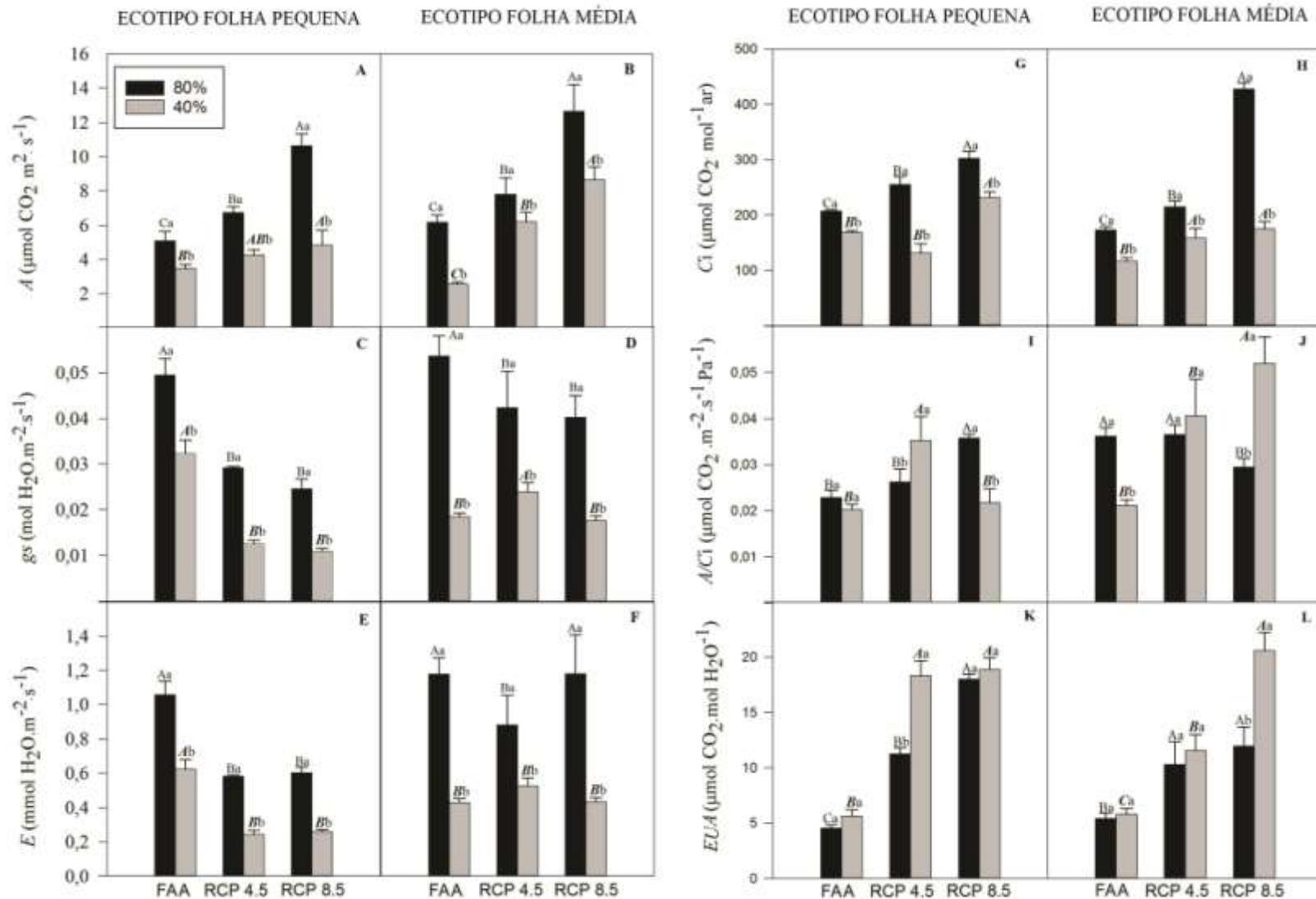


Figura 6. Medidas das variáveis das trocas gasosas em plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4,5 e 8,5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água do substrato). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% de umidade do substrato) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

7.3. Análise de componentes principais das variáveis de crescimento e trocas gasosas

Os dados foram dimensionados nos dois primeiros componentes principais (CP's) os quais representam 72% (CP1: 49% e CP2: 23%) das informações dos resultados do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) e 74% (CP1: 55% e CP2: 19%) dos resultados do ecotipo folha média (tolerante ao sol) (Fig. 7), explicando a maior parte da variabilidade total. Usando essa abordagem é possível observar que os ecotipos respondem de maneira semelhante aos cenários climáticos e umidade do substrato (Fig. 7).

Nos mapas fatoriais do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra), o grupo de indivíduos do tratamento RCP 8.5 (80%) foi caracterizado por apresentar coordenada positiva alta no eixo do CP1, indicando altos valores para as variáveis NF, A/C_i , carbono interno (C_i), altura do caule (AC), TAL, MST, *EUA* e TCR (Fig. 10A; 10B). Por outro lado, o grupo de indivíduos do tratamento CAF (40%), localizados no plano do lado superior esquerdo, apresenta uma coordenada negativa alta, representando menores valores para as variáveis AC, TCR, MST, C_i , TAL, AFT, NF e A/C_i para esse tratamento (Fig. 7A; 7B). No CP2, o grupo de indivíduos dos tratamentos RCP 4.5 (40%) e RCP 8.5 (40%), caracterizado por coordenadas positivas fortes, resultam em maiores valores de *EUA* (Fig. 7C; 7D).

Nos mapas fatoriais do ecotipo folha média (tolerante ao sol), o CP1 mantém indivíduos dos tratamentos RCP 4.5 (80%) e RCP 8.5 (80%) à direita do mapa fatorial, devido a coordenadas positivas altas, indicando maiores valores para as variáveis TAL, MST, C_i , TCR, NF, AC, AFT, *E* e *gs* para as plantas desses tratamentos (Fig. 7C; 7D). O grupo de indivíduos do tratamento CAF (40%) apresentou coordenada negativa alta representando menores valores para as variáveis NF, AC, *EUA*, C_i , A/C_i , TAL, MST e AFT (Fig. 7C). As variáveis *EUA* e A/C_i estão correlacionadas com o CP2, representando valores elevados no plano para o grupo de indivíduos do tratamento RCP 8.5 (40%). O grupo de indivíduos do tratamento CAF (80%) explica grande parte da variabilidade total dos resultados de A (Fig. 7C).

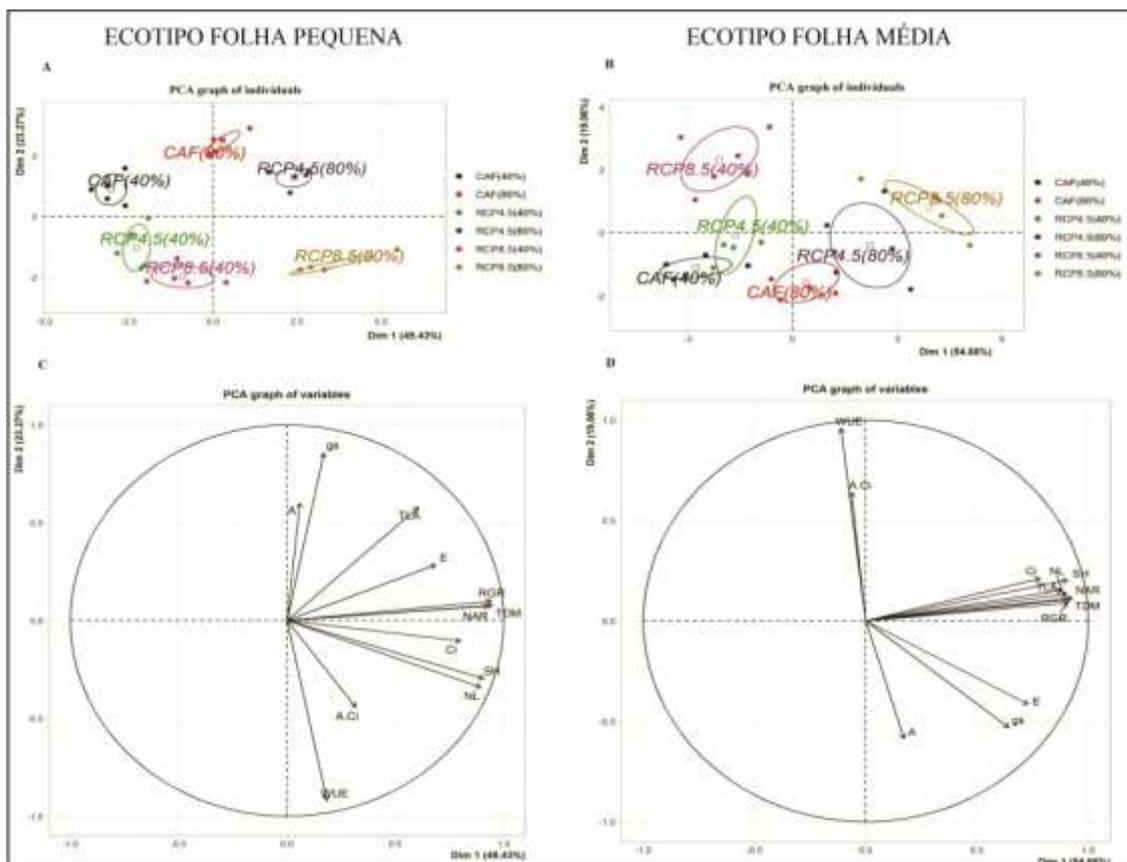


Figura 7. Análise dos componentes principais dos ecotipos tolerante a sombra e tolerantes ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição nos tratamentos: FAA (40%), FAA (80%), RCP 8,5(40%). RCP 4,5 (80%), RCP 8,5 (40%) e RCP 8,5 (80%). A, B Mapa fatorial de indivíduos e C, D Mapa fatorial de variáveis. Em que: SH = altura do caule, NL = número de folíolos, TDM = massa seca total, TLA = área foliar total, RGR = taxa de crescimento relativa, NAR = taxa de assimilação líquida, A = taxa de assimilação líquida de CO₂, gs = condutância estomática, E = taxa de transpiração, Ci = concentração de carbono intracelular, A/Ci = eficiência de carboxilação, WUE = eficiência de uso da água (Siglas em inglês)

7.4. Potencial hídrico foliar (Ψ_w)

Os cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5 não influenciaram na no Ψ_w das plantas dos dois ecotipos em relação ao cenário climático da FAA. Nos três cenários climáticos, os dois ecotipos apresentaram baixos valores de Ψ_w (Fig. 8A; 8B).

A disponibilidade de água no substrato mostrou efeito mais expressivo nas plantas sob restrição hídrica (40% de umidade do substrato) em todos os cenários, como indicado pelos valores de Ψ_w mais negativos comparado a 80% de umidade do substrato (Fig. 8A; 8B). O cenário onde as plantas dos dois ecotipos apresentaram valores de Ψ_w mais negativos foi o RCP 8.5, indicando ser um o cenário mais estressante para as plantas (Fig. 8A; 8B).

Nas plantas do ecotipo tolerante a sombra submetida a 80% de umidade não foi observada diferença significativa nos valores de Ψ_w entre os cenários avaliados (Fig.

8A). Por outro lado, nas plantas do ecotipo tolerante ao sol cultivadas sob 80% de umidade do substrato o Ψ_w alcançou valores mais negativos no cenário RCP 8.5. Quando submetidas a 40% de umidade do substrato, o Ψ_w das plantas de todos os cenários estudados foi ainda mais negativo, principalmente no RCP 8.5 (Fig. 8B).

7.5. Crop water stress index (CWSI)

Os resultados de CWSI, um indicador de condições de estresse hídrico e térmico nos dois ecotipos no decorrer do dia pode ser observado na Figura 8. Nos horários avaliados (10, 12 e 15h00min), os valores de CWSI mantiveram-se abaixo de 0,7. Os valores mais altos de CWSI ocorreram nas plantas sob 40% de umidade do substrato. Por outro lado, as plantas dos dois ecotipos conduzidas em substrato com 80% de umidade, os valores de CWSI foram mais baixos nos três horários analisados.

Observa-se que os dois ecotipos apresentaram comportamentos diferenciado em relação as respostas de CWSI. As plantas do ecotipo tolerante a sombra sob restrição hídrica (40% umidade do substrato) apresentaram valores mais altos em RCP 4.5 às 10h00min e 12h00min seguido de decréscimo às 15h00min (Fig. 8C, 8E, 8G).

As plantas do ecotipo tolerante ao sol tratadas com 40% de umidade do substrato apresentaram os maiores valores de CWSI no cenário RCP 4.5 nos três horários avaliados, mantendo os valores próximos a 0,5 (Fig. 8D, 8F, 8H).

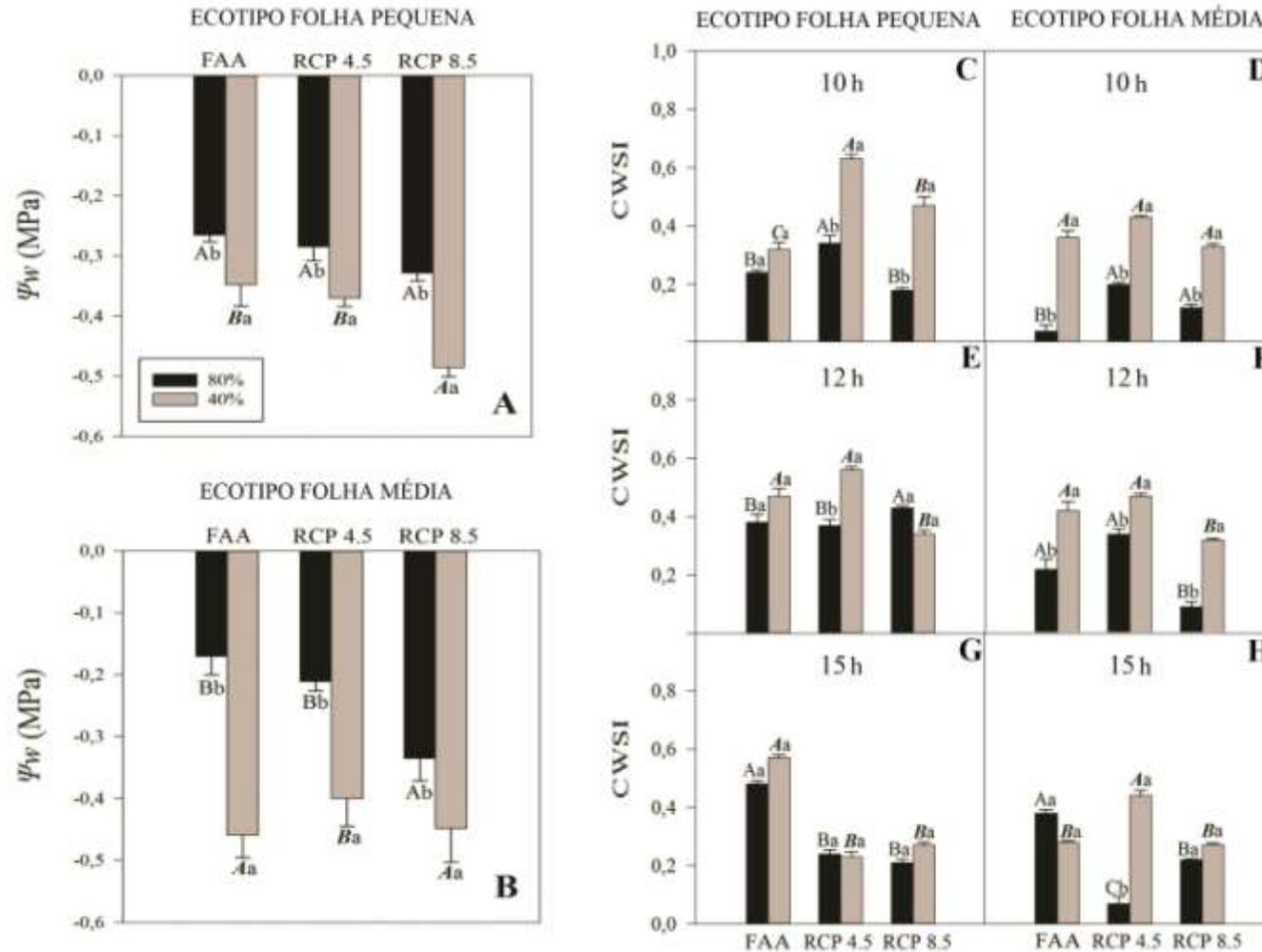


Figura 8. Valores de potencial hídrico (Ψ_w) e Crop water stress index (CWSI) em plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

7.6. Fluorescência da clorofila *a*

Os cenários climáticos e a umidade do substrato influenciaram a F_v/F_m no ecotipo tolerante a sombra (Fig. 9A) em que menores valores ocorreram no cenário RCP 8.5, especialmente em plantas conduzidas em substrato com 40% de umidade.

Nas plantas do ecotipo tolerante a sombra, não foi constatada diferença significativa entre as plantas do cenário atual da FAA e RCP 4.5, independentemente da disponibilidade hídrica no substrato (Fig. 9A).

A F_v/F_m nas plantas do ecotipo tolerante ao sol não apresentou diferença significativa entre os tratamentos (cenários climáticos e % de umidade no substrato) (Fig. 9B). As plantas dos dois ecotipos cultivadas com 80% de umidade do substrato apresentaram os maiores valores de PI_{ABS} e F_v/F_0 nos cenários RCP 4.5 e 8.5 (Fig. 9C; 9D). Nos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5, as plantas dos dois ecotipos sob 40% de umidade do substrato, apresentaram os maiores valores de DI_0/RC , ET_0/RC , TR_0/RC , ABS/RC , V_j , V_i e M_0 (Fig. 9C; 9D). No cenário atual da FAA, as plantas dos dois ecotipos cultivadas com 40% de umidade do substrato apresentaram, de maneira geral valores inferiores na maioria das variáveis da fluorescência da clorofila *a* (Fig. 9C; 9D).

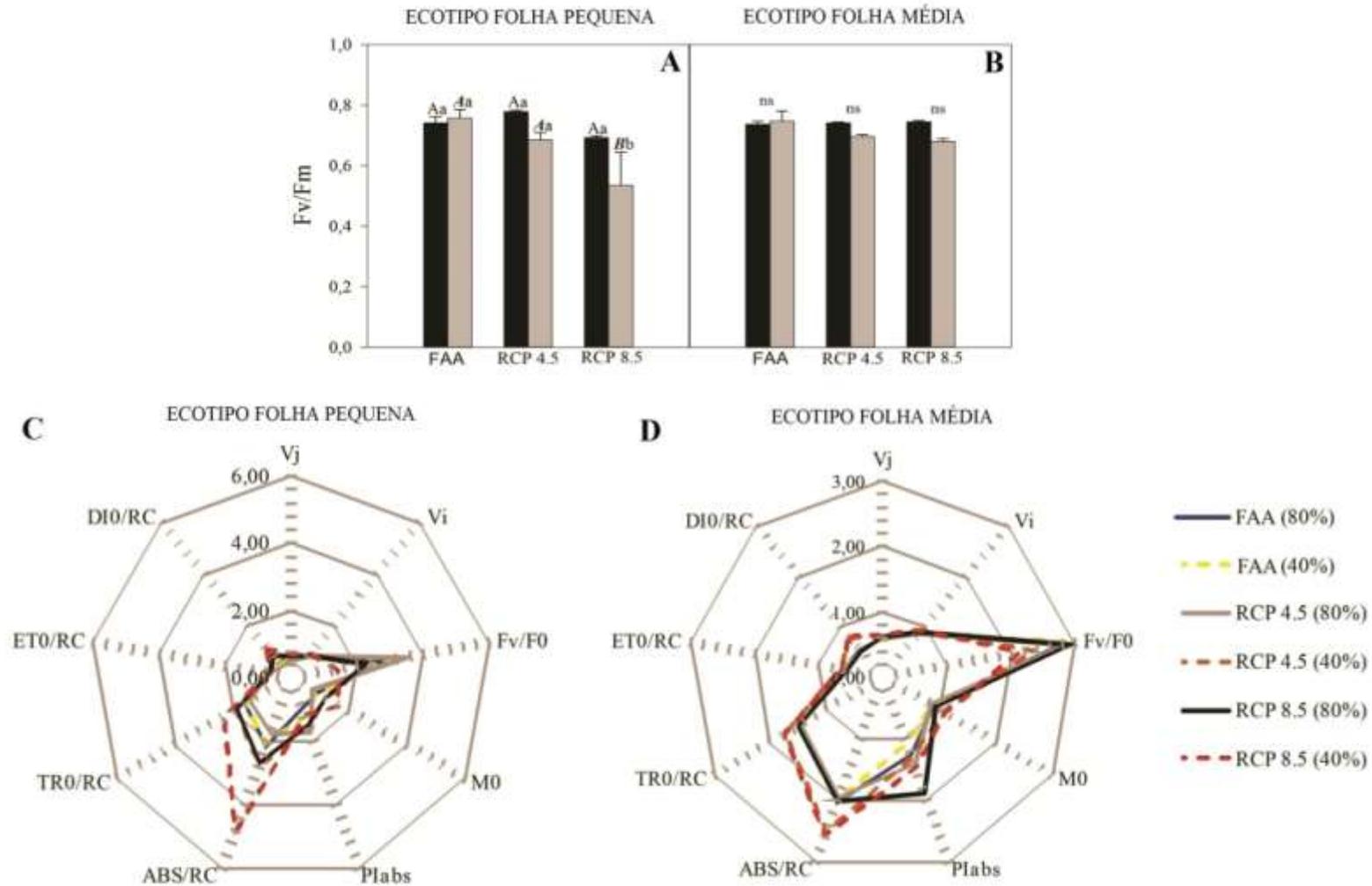


Figura 9. Parâmetros de fluorescência transitória em plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade do substrato (80e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários climáticos são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/itálico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$) e ns = não significativo

7.7. Análise de componentes principais

Os dados de CWSI e da fluorescência da clorofila *a* foram dimensionados nos dois primeiros componentes principais que representam 66.83% das informações dos resultados do ecotipo tolerante a sombra (Fig. 10A; 10C) e 68.86% dos resultados do ecotipo tolerante ao sol (Fig. 10B; 10D). Por essa abordagem é possível observar como os dois ecotipos responderam semelhantemente dentro de cada cenário climático em relação a aos valores de umidade dosubstrato (Fig. 10).

No ecotipo tolerante a sombra, na primeira dimensão, o grupo de indivíduos caracterizado por uma coordenada forte no eixo, indica valores elevados para as variáveis RDM, LDM, SDM e PI_{ABS} , e o grupo de indivíduos com coordenada negativa no eixo, indica valores elevados para as variáveis CWSIa e CWSIb (Fig. 10A; 10C).

Na segunda dimensão, as coordenadas positivas estão relacionadas aos valores mais elevados de CWSIc, e as coordenadas negativas relacionadas aos valores mais baixos de LWP e F_v/F_m (Fig 10A; 10C).

No ecotipo tolerante ao sol, na primeira dimensão, o grupo de indivíduos caracterizado por uma coordenada forte no eixo, indica valores elevados para as variáveis SDM, LDM e PI_{ABS} e valores mais baixos para as variáveis CWSIa e CWSIb (Fig. 10B; 10D).

O grupo de indivíduos com coordenada negativa no eixo são relacionados a valores elevados de CWSIa e CWSIb, além de baixos valores de SDM, LDM, PI_{ABS} e F_v/F_m (Fig. 10B; 10D).

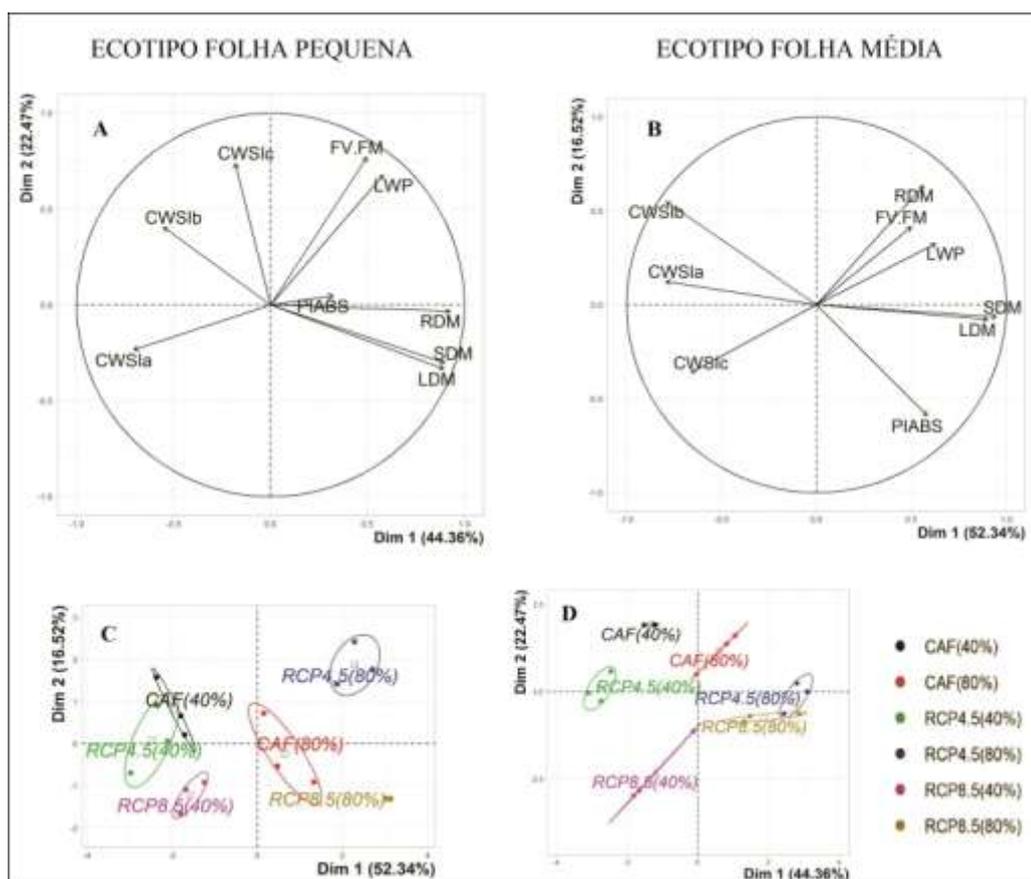


Figura 10. Análise de componentes principais de variáveis ecofisiológicas em plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* nos respectivos tratamentos: A) FAA (80%), B) FAA (40%), C) RCP 4.5 (80%), D) RCP 4.5 (40%), E) RCP 8.5 (80%) e F) RCP 8.5 (40%). A,B) Mapa fatorial das variáveis e C,D) mapa fatorial dos indivíduos. Em que: LDM = leaf dry mass, SDM = stem dry mass, RDM = root dry mass, LWP = leaf water potential, CWSIa = crop water stress index 10h00min horas, CWSIb = crop water stress index 12h00min horas, CWSIc = crop water stress index 15h00min horas, FV.FM = rendimento quântico e PI_{ABS} = índice de desempenho potencial do PSII (Siglas em inglês).

7.8. Polímeros de parede celular

Os teores de celulose e lignina do caule dos dois ecotipos apresentaram diferença entre todos os tratamentos (cenários climáticos e umidades do substrato) (Fig. 11A; 11B; 11E; 11F). Os teores das hemiceluloses do caule dos dois ecotipos não apresentaram diferença significativa entre os cenários climáticos e umidades do substrato (Fig. 11C; 11D). O teor de umidade do substrato estimulou o aumento no teor de celulose e lignina nas plantas dos dois ecotipos, principalmente nos cenários FAA e RCP 8.5.

Dentro do cenário atual (FAA), as plantas do ecotipo tolerante a sombra, cultivadas com 80% de umidade no substrato apresentaram maiores teores de celulose e lignina (Fig. 11A; 11E). Além disso, nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, as plantas

cultivadas com 40% de umidade no substrato obtiveram maior teor de celulose que as do cenário atual da FAA (Fig. 11A). Por outro lado, para o teor de lignina entre os níveis de umidade no substrato no cenário RCP 4.5 não houve diferença significativa (Fig 11E).

As plantas do ecotipo tolerante ao sol cultivadas no cenário atual da FAA em 40% de umidade do substrato apresentaram maior teor de celulose no caule comparado aos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, diferentemente das plantas com 80% de umidade no substrato, pois estas obtiveram maiores teores de celulose do caule nos cenários FAA e RCP 4.5 (Fig. 11B). Além disso, no cenário RCP 4.5, não foi observado diferenças nos teores de celulose do caule entre os níveis de umidade do substrato. As plantas conduzidas no cenário RCP 8.5 mostraram os menores teores de celulose no caule independentemente do nível de umidade no substrato.

Em relação à lignina, as plantas do ecotipo tolerante ao sol conduzidas nos cenários FAA e RCP 8.5 obtiveram o mesmo comportamento independentemente do nível de umidade do substrato (Fig. 11F). Por outro lado, no cenário RCP 4.5, as plantas obtiveram menores teores de lignina sem variação entre os teores de umidade no substrato.

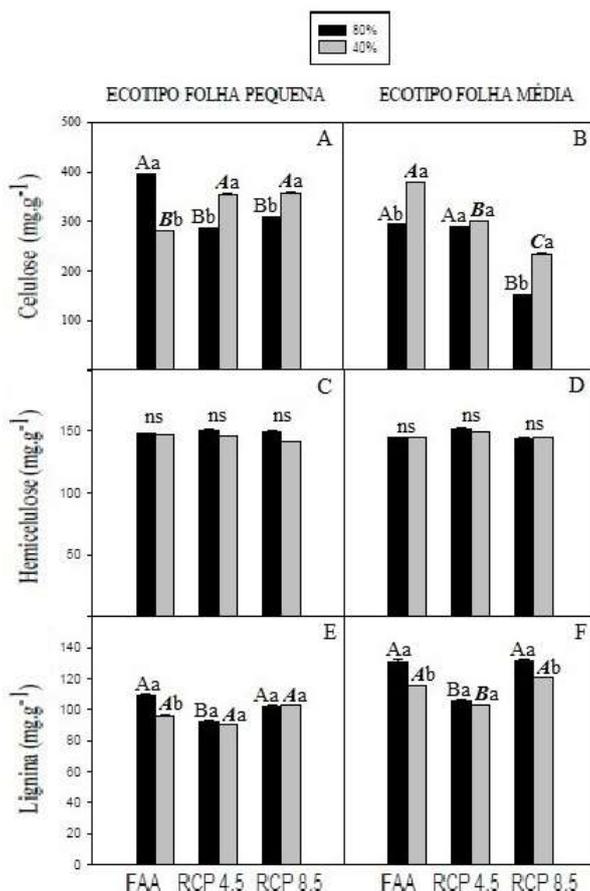


Figura 11. Teores dos polímeros de parede celular (celulose, hemiceluloses e lignina) do caule das plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e em dois níveis de umidade do substrato (80e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $p \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/itálico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

7.9. Carboidratos não estruturais

Os cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e 8.5 alteraram significativamente os teores dos açúcares solúveis nas folhas, caule e raízes das plantas dos dois ecotipos (Fig. 12). De forma geral, observa-se maiores teores de açúcares solúveis no ecotipo tolerante a sombra, principalmente nas plantas cultivadas em substrato com 40% de umidade, independentemente do cenário climático. O ecotipo tolerante ao sol apresentou os maiores teores de açúcares solúveis nas raízes, independentemente do cenário e umidade do substrato (Fig. 12).

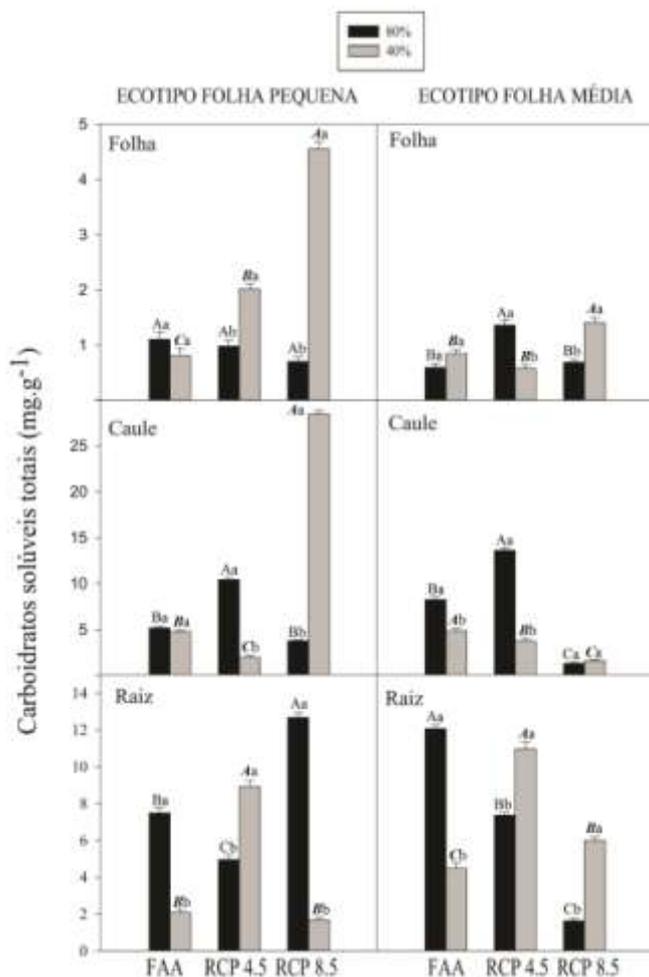


Figura 12. Teores de açúcares solúveis em folhas, caules e raízes das plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade no substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

As respostas de glicose, frutose e sacarose mostraram variações entre os ecotipos e entre os órgãos vegetativos (Fig. 13). Nota-se que o ecotipo tolerante a sombra acumulou maiores valores de glicose no caule de plantas conduzidas em substratos com 80% de umidade e submetidas nos cenários climáticos FAA e RCP 4.5. Por outro lado, as plantas conduzidas em substrato com 40% de umidade obtiveram maiores valores de glicose em folhas e submetidas nos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5.

O ecotipo tolerante ao sol acumulou maiores valores de glicose nas raízes de plantas conduzidas em substratos com 80% de umidade e submetidas nos cenários climáticos FAA e RCP 4.5 (Fig. 13). Enquanto as plantas conduzidas em substrato com

40% de umidade obtiveram maiores valores de glicose em raízes de plantas submetidas ao cenário climático RCP 4.5.

Em relação a alocação dos carboidratos não estruturais (açúcares solúveis e amido), encontramos interação entre os cenários climáticos e o nível de umidade no substrato para todas as variáveis analisadas, exceto para o amido nas folhas do ecotipo tolerante a sombra (Fig. 13; Tab. S5; S6).

O amido foi o carboidrato mais representativo nos órgãos vegetativos dos dois ecotipos (Fig. 13). As plantas dos dois ecotipos cultivadas nos cenários RCP 4.5 e 8.5 mostraram maior acúmulo de amido, principalmente nas raízes, quando sob influência de 40% de umidade do substrato (Fig. 13). No cenário atual (FAA), observamos maiores teores de amido nas raízes das plantas do ecotipo tolerante ao sol quando cultivadas com 40% de umidade no substrato e nas plantas do ecotipo tolerante a sombra sob 80% de umidade no substrato (Fig. 13).

Em relação aos açúcares solúveis, a sacarose se concentrou nos órgãos vegetativos das plantas dos dois ecotipos nos cenários simulados, com reflexo no acúmulo de açúcares solúveis (Fig. 12; 13). Maiores teores de glicose e frutose foram observados nas plantas dos dois ecotipos nos cenários RCP 4.5 e 8.5, especialmente com 40% de umidade no substrato (Fig. 13). Nos cenários RCP 4.5 e 8.5, a ordem decrescente de acúmulo de amido das plantas do ecotipo tolerante a sombra foi raiz > caule > folha, independentemente do nível de água no substrato. No cenário RCP 8.5, a ordem decrescente de acúmulo de amido nas plantas do ecotipo tolerante ao sol em 40% de umidade no substrato foi raiz > caule > folha enquanto no cenário RCP 4.5, as plantas do mesmo ecotipo foi caule > raiz > folha, independentemente das condições hídricas do substrato (Fig. 13).

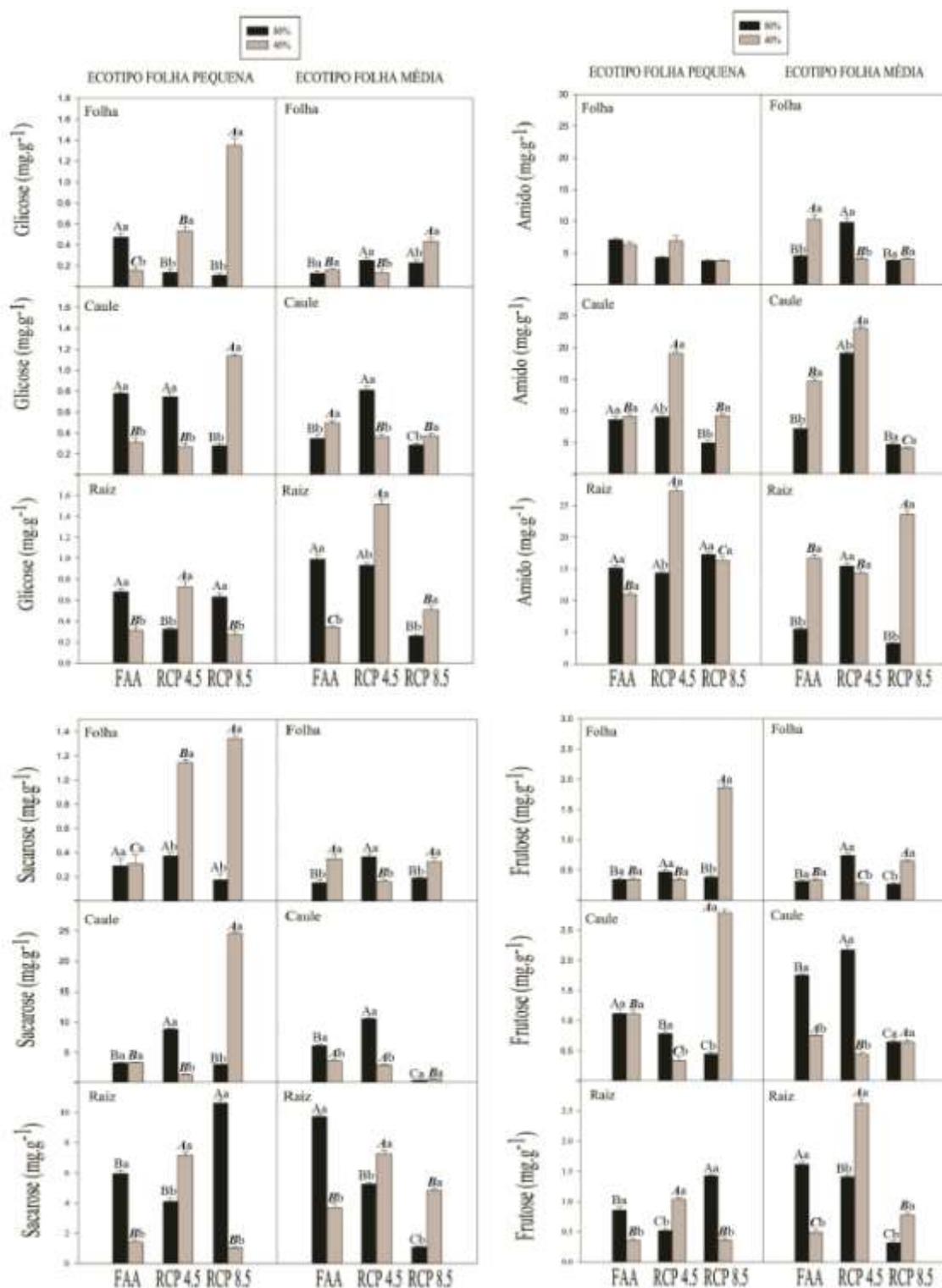


Figura 13. Teores de carboidratos não estruturais (amido, glicose, sacarose e frutose em folhas, caules e raízes das plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* aos 90 dias de exposição em três cenários climáticos (FAA, RCP 4.5 e 8.5) e dois níveis de umidade no substrato (80 e 40% da capacidade de retenção de água). Letras diferentes representam diferenças significativas entre os tratamentos (Tukey, $P \leq 0,05$). As diferenças estatísticas entre os cenários são representadas por letras maiúsculas (letras maiúsculas para 80% e maiúsculas em negrito/italico para 40% da

capacidade de retenção de água) e entre os níveis de umidade dentro de cada cenário por letras minúsculas. Os valores representam médias \pm erro padrão ($n = 5$)

7.10. Análise de componentes principais

Os dois primeiros componentes representam 65.72% das informações dos resultados do ecotipo tolerante a sombra (Fig. 14A; 14B) e 61.80% dos resultados do ecotipo tolerante ao sol (Fig. 14C; 14D).

No ecotipo tolerante a sombra, na primeira dimensão, o grupo de indivíduos caracterizado por uma coordenada forte no eixo, indica valores elevados para as variáveis Gfolha, Ffolha, Sfolha, Fcaule e Scaule (Fig. 14A; 14B). Na segunda dimensão, o grupo de indivíduos com coordenada negativa no eixo está relacionado com valores mais altos da variável Hem. O grupo de indivíduos com coordenadas positivas indicam valores mais altos das variáveis Araiz, Graiz, Fraiz, Sraiz (Fig. 14A; 14B).

As plantas do ecotipo tolerante a sombra apresentou os maiores valores das variáveis Gcaule, Fcaule, Scaule, Ffolha e Gfolha no tratamento RCP 8.5 (40%). Nos tratamentos RCP 4.5 (80%) e FAA (40%) são observados os maiores valores da variável Hem e nos tratamentos RCP 8.5 (80%), RCP 4.5 (40%) e FAA (80%) os maiores valores das variáveis Araiz, Sraiz, Fraiz, Graiz (Fig. 14A; 14B).

No ecotipo tolerante ao sol, na primeira dimensão, o grupo de indivíduos caracterizado por uma coordenada forte no eixo, indica valores elevados para as variáveis Fraiz, Graiz e Sraiz, e valores mais baixos para as variáveis Ffolha, Gfolha e Sfolha (Fig. 14C; 14D). Na segunda dimensão, as coordenadas negativas são relacionadas aos valores mais altos de Araiz, Sfolha e Gfolha, e baixos valores de Graiz e Fraiz (Fig 14C; 14D).

As plantas do ecotipo tolerante ao sol apresentaram os maiores valores das variáveis Gfolha e Lig nos tratamentos FAA (40%) e RCP 8.5 (40%). Nos tratamentos RCP 4.5 (40%) e FAA (80%) são observados os valores mais altos das variáveis Fraiz, Graiz, Sraiz e Hem. O tratamento RCP 4.5 (80%) apresentou os maiores valores das variáveis Gcaule, Fcaule, Scaule e Cel (Fig. 14C; 14D).

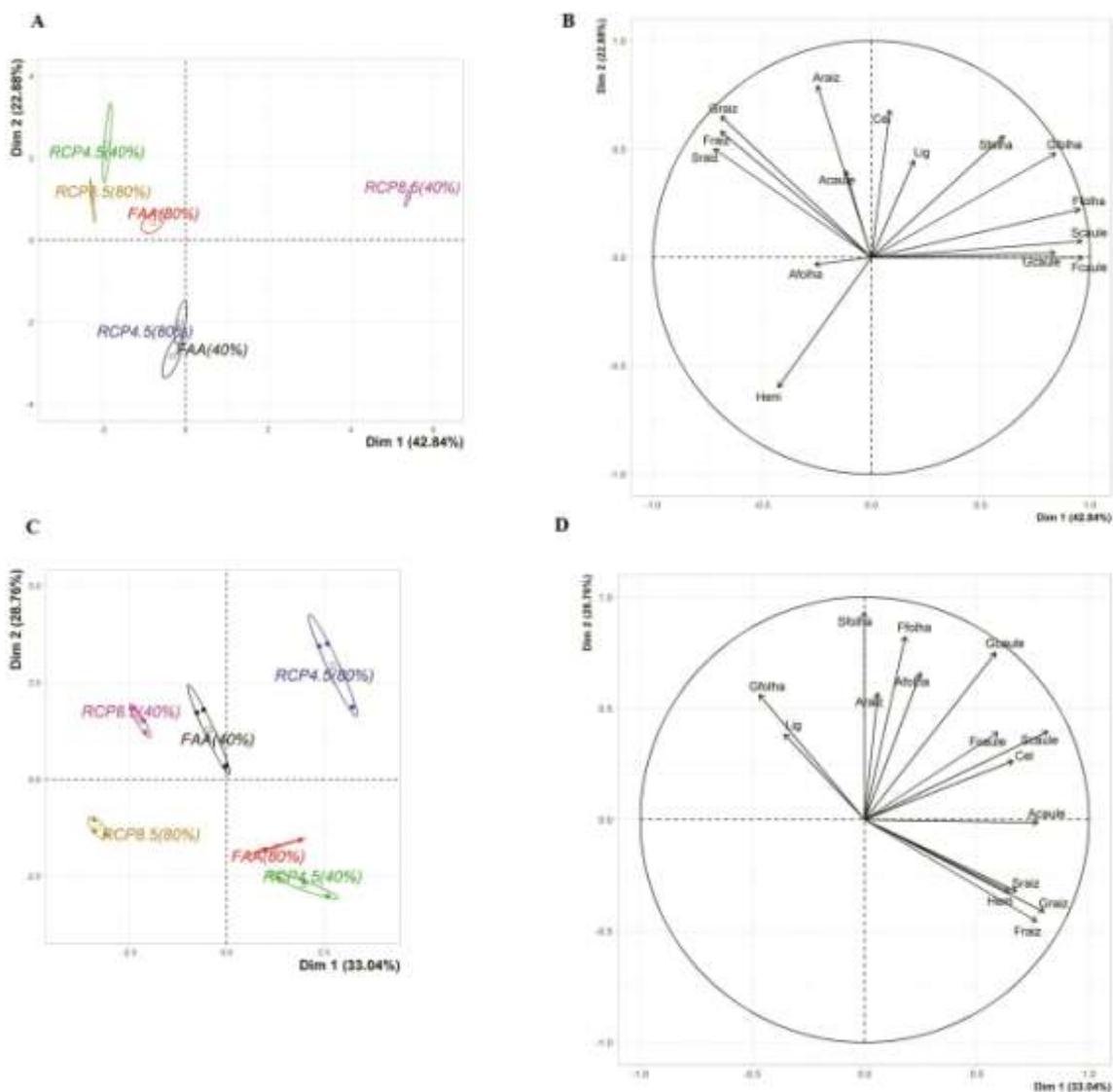


Figura 14. Análise de componentes principais de variáveis ecofisiológicas em plantas dos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata* dos respectivos tratamentos: A) FAA (80%), B) FAA (40%), C) RCP 4.5 (80%), D) RCP 4.5 (40%), E) RCP 8.5 (80%) e F) RCP 8.5 (40%). A,B) Mapa fatorial das variáveis e dos indivíduos do ecotipo tolerante a sombra. C,D) Mapa fatorial das variáveis e dos indivíduos do ecotipo tolerante ao sol. Em que: Cel – teor de celulose do caule, Hem – teor de hemicelulose do caule, Lig – teor de lignina do caule, Afolha – teor de amido da folha, Acaule – teor de amido do caule, Araiz – teor de amido da raiz, Gfolha – teor glicose da folha, Gcaule – teor de glicose do caule, Graiz – teor de glicose da raiz, Ffolha – teor de frutose da folha, Fcaule – teor de frutose do caule, Fraiz – teor de frutose da raiz, Sfolha – teor de sacarose da folha, Scaule – teor de sacarose do caule e Sraiz – teor de sacarose da raiz

8. DISCUSSÃO

8.1. Crescimento

Considerando que as espécies de sombra se desenvolvem em locais frescos e úmidos e as espécies de sol em locais quentes e secos (FINEGAN, 1984), era esperado um menor crescimento do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5) com maior temperatura, DPV e menor umidade do substrato em relação ao ecotipo folha média (tolerante ao sol).

O aumento da $[CO_2]$ em RCP 4.5 e 8.5 estimulou o crescimento das plantas dos dois ecotipos de *P. echinata*, independentemente da umidade do substrato. Nossos resultados revelaram que nos cenários de mudanças climáticas, em elevada $[CO_2]$, as variáveis de crescimento altura, número de foliólulos, área foliar, taxa de assimilação líquida, taxa de crescimento e massa seca total dos dois ecotipos aumentaram, independentemente da umidade disponível no substrato. Esses resultados revelam que o CO_2 possui capacidade de atuar na mitigação e correção de possíveis impactos negativos no crescimento dos ecotipos de *P. echinata* nessas novas condições ambientais. Em espécies com via metabólica C_3 , o crescimento pode ser estimulado pela elevação da concentração de CO_2 ao diminuir as perdas de carbono pela fotorrespiração (WELLER et al., 2019).

O hábito heliófilo do ecotipo tolerante ao sol, bem adaptado a ambientes mais secos e quentes (POORTER et al., 2010; ROSSATO; KOLB, 2010; GAMA et al., 2020), resultou no maior crescimento inicial dessas plantas nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e RCP 8.5). O ecotipo tolerante a sombra, mesmo sendo adaptado a ambientes mais úmidos e frescos (POORTER et al., 2010; ROSSATO; KOLB, 2010; GAMA et al., 2020), apresentou maior crescimento inicial nos cenários de mudanças climáticas com aumentos na concentração de CO_2 e temperatura (RCP 4.5 e RCP 8.5), independentemente da umidade disponível no substrato.

Em condições de elevada $[CO_2]$, as plantas do ecotipo tolerante a sombra investiu mais em área foliar, emitindo um maior número de foliólulos do que as plantas do ecotipo tolerante ao sol. Essas mudanças na produção de área foliar e consequentemente na produção de biomassa em plantas cultivadas em elevada $[CO_2]$ são ajustes morfológicos de adaptação importantes das plantas, sobretudo para tolerar condições ambientais adversas.

8.2. Trocas gasosas

Os aumentos nas taxas de assimilação de CO_2 (A), observados nas plantas dos ecotipos de *P. echinata*, cultivadas em elevada $[\text{CO}_2]$, segue o padrão encontrado para as espécies pioneiras e não pioneiras (AINSWORTH; ROGERS, 2007; ARENQUE et al., 2014; AVILA et al., 2020; MARÇAL et al., 2021). Os resultados mostram um efeito fertilizante do CO_2 nas trocas gasosas dos dois ecotipos, melhorando a fotossíntese nos cenários de mudanças climáticas RCP 4.5 e RCP 8.5. O aumento da $[\text{CO}_2]$ beneficiou a fotossíntese das plantas, justamente por aumentar a atividade de carboxilação da RuBisCO nessas novas condições ambientais (LEAKEY et al., 2009).

De acordo com Avila et al. (2020), o aumento de A e da área foliar em elevada $[\text{CO}_2]$, aumenta a capacidade da fonte de assimilados, melhorando a eficiência fotossintética das plantas, resultando em maior produção e acúmulo biomassa. Este efeito benéfico no crescimento das plantas sob elevada concentração de CO_2 ocorre em função da redução das perdas de carbono pela fotorrespiração, melhorando a eficiência fotossintética (WELLER et al., 2019). Este resultado mostra que o CO_2 atmosférico possui capacidade de atuar na mitigação de possíveis impactos negativos no crescimento das plantas sob o efeito das mudanças climáticas futuras.

As plantas dos dois ecotipos cultivadas em RCP 4.5 e 8.5 reduziram a g_s e E , resultados também encontrados por Arenque et al. (2014) e Cai et al. (2018). Além disso, sob menor umidade no substrato, as plantas fecharam parcialmente os estômatos provocando reduções na g_s como resposta preventiva para manter as outras atividades fisiológicas, como por exemplo a A e E , principalmente em condições de déficit hídrico (SINCLAIR et al., 2018).

A menor abertura estomática mostrada em plantas cultivadas em elevada $[\text{CO}_2]$ reduz as perdas de água por transpiração, mas não compromete C_i (ZHOU et al., 2020). A maior $[\text{CO}_2]$ fez com que as plantas dos dois ecotipos acumulassem mais C_i , mesmo quando cultivadas em menor disponibilidade de água no substrato. A maior C_i nos dois ecotipos cultivadas em elevada $[\text{CO}_2]$ nos cenários RCP 4.5 e 8.5 aumentou A/C_i , indicando que não houve grandes limitações em A e g_s , em nem na atividade de carboxilação da RuBisCO (MENDES et al., 2017).

Nas espécies de plantas com metabolismo fotossintético C_3 , aumentos na $[\text{CO}_2]$ podem causar aumento da EUA (CERNUSAK, 2018). Os dois ecotipos de *P. echinata* apresentaram aumentos da EUA à medida que aumentou a $[\text{CO}_2]$ nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5), comparadas ao cenário climático atual (FAA).

8.3. Potencial hídrico foliar, crop water stress index e fluorescência transiente da clorofila *a*

Os resultados mostraram como as condições climáticas de cenários futuros podem influenciar na ecofisiologia de plantas tolerante a sombra e tolerante ao sol. O Ψ_w de antemã representa um importante indicador de estresse hídrico, pois as medições são realizadas antes do nascer do sol e as plantas se encontram em máxima turgescência (DING et al., 2014).

As plantas tolerantes à sombra apresentaram pequena variação no Ψ_w nos cenários de mudanças climáticas estudados, mantiveram valores menos negativos, sem sinais de estresse hídrico, caracterizado pelo desequilíbrio entre a disponibilidade de água no substrato e a demanda evaporativa (TARDIEU et al., 2011). Indicando que a água disponível para as plantas foi suficiente para manter o Ψ_w em equilíbrio para regular a turgescência celular e do ajuste osmótico (BLAYA-ROS et al., 2021), mantendo as plantas em condições fisiológicas adequadas para se adaptarem principalmente com uma menor quantidade de água disponível no substrato nos cenários com aumentos da $[\text{CO}_2]$, temperatura e DPV.

O índice de estresse hídrico CWSI, mostrou ser um bom indicador de estresse hídrico nos ecotipos tolerante a sombra e tolerante ao sol de *P. echinata*, apesar de raramente ser utilizado em arbóreas (TESTI et al., 2008). A menor umidade no substrato afetou o CWSI nas plantas dos cenários climáticos RCP 4.5 e 8.5, indicando que o processo de troca de calor nas folhas foi intensificando. Vale ressaltar que o CWSI é um índice que indica o nível de estresse hídrico e que varia dentro de uma faixa de valores entre 0 e 1, sendo que valores próximos de 1 indicam que as plantas estão totalmente estressadas, e próximos de 0, que as plantas estão bem hidratadas (VAZQUEZ, 2013). Alguns autores consideram valores de CWSI acima de 0,7 como indicativo de sinais estressantes nas plantas, (BELLVERT et al., 2014; MATESE et al., 2018).

A temperatura da folha está diretamente relacionada com a abertura e fechamento estomático. Isso pode elevar os índices de CWSI sob menor umidade do substrato, dependendo da sensibilidade da espécie ao aumento da $[\text{CO}_2]$, temperatura e DPV (POU et al., 2014; GARCÍA-TEJERO et al., 2016).

Amaral et al. (2021) trabalhando com uma espécie de subbosque nativa da amazônica, observaram que condições de limitação hídrica (substrato com 40% de umidade) no substrato obteve resultados elevados de CWSI. Nesse aspecto, percebe-se

que os ecotipos de pau-brasil obtiveram os processos de dissipação de calor e resfriamento das folhas afetado ao longo do dia, mantendo valores de CWSI de baixo a moderados, possivelmente por aumentar a dissipação de calor nas folhas e intensificar o resfriamento, regulando as trocas de calor em condições estressantes. Essas alterações são fundamentais para garantir que os ecotipos alcançassem maior desempenho fotossintético nos cenários de mudanças climáticas em função da disponibilidade hídrica, mantendo o status hídrico normal e aumentando o crescimento, principalmente nas horas mais quentes do dia.

Os parâmetros do teste-JIP relacionados à cinética da fluorescência transiente da clorofila *a*, mostram eficiência na detecção de condições estressantes por identificar danos fotoinibitórios que afetam o desempenho fotossintético, coletando um conjunto de dados nas propriedades fisiológicas e fotoquímicas das plantas (STRASSER et al., 2000).

As plantas dos dois ecotipos conduzidas em elevada [CO₂] nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5) apresentaram os maiores valores de desempenho da atividade funcional do PSII, desempenho fotoquímico e fixação de CO₂ dessas plantas. A redução de F_v/F_m do ecotipo tolerante a sombra em 40% de umidade do substrato pode estar relacionada ao aumento da dissipação de energia térmica de seu PSII (ADAMS et al., 2013).

Em condições de menor umidade no substrato, a linearidade entre o desempenho fotossintético e a taxa de transporte de elétrons é inválida, devido ao fechamento estomático provocado pelo aumento da demanda atmosférica e menor umidade do substrato (STOCKER et al., 2018).

Com o aumento dos níveis de CO₂ nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5), as plantas dos dois ecotipos de pau-brasil expressaram maior atividade de carboxilação (figura 6) e transporte de elétrons (figura 9), influenciando positivamente o desempenho fotossintético e a fixação de carbono.

8.4. Carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular

A interação do CO₂ com a menor umidade do ar combinado com o aquecimento pode ter gerado respostas positivas no crescimento das plantas dos dois ecotipos. Os ajustes de crescimento dos dois ecotipos de *P. echinata*, crescendo em condições temperaturas altas associadas à restrição hídrica no substrato, podem está relacionado com a atividade dos polissacarídeos e enzimas da parede celular. Geralmente, as

alterações morfológicas de plantas crescendo sob déficit hídrico são resultados das modificações na parede celular, e para tolerar essas condições algumas espécies sofrem alterações no metabolismo de polímeros de parede celular (LEGALL et al., 2015).

Com a exposição a temperaturas altas constantes, as plantas sofrem modificações bioquímicas, alterando a síntese de polímeros da parede celular (MAKSIC et al., 2022). Como os dois ecotipos não sofreram impactos negativos na composição da parede celular, isso indica que a síntese de polímeros da parede celular não foi afetada pelo estresse térmico em CO₂ elevado. Sob tais condições, independentemente das variações da umidade atmosférica e do substrato, os teores de celulose, hemiceluloses e lignina do caule não sofreram mudanças. Um importante mecanismo é a lignificação dos tecidos capaz de aumentar a resistência e a rigidez da parede celular por incremento de lignina associado ao acúmulo de celulose e hemicelulose (BUCKERIDGE et al., 2008), conferindo maior tolerância aos dois ecotipos nos cenários de mudanças climáticas por alocação de carbono estrutural.

Existe uma distinção entre as classes de espécies pioneiras e não pioneiras em relação aos reservatórios de carbono. As espécies pioneiras ou tolerantes ao sol investem mais em reservatórios energéticos, devido ao crescimento inicial mais rápido, enquanto as espécies não pioneiras ou tolerantes à sombra, investem mais em reservatórios estruturais, devido a taxa de crescimento inicial mais lenta (POORTER et al., 2008, 2010).

Um fator que influenciou no acúmulo de todos os componentes ecofisiológicos, foi a disponibilidade hídrica, que elevou o teor de celulose no caule e maior alocação de amido, glicose, frutose e sacarose nos órgãos vegetativos.

A alocação de carbono pode ser associada com a necessidade de ajuste osmótico, que se relacionando diretamente com a biossíntese de açúcares solúveis em condições ambientais estressantes, isso ocorre devido ao acúmulo de solutos no citosol para diminuir o potencial osmótico, que mantém o potencial hídrico e o turgor das células em condições normais (FILHO; SERAPHIN, 2001; CORDEIRO et al., 2017).

Para tolerar condições atmosféricas alteradas, algumas arbóreas apresentam mecanismos de tolerância ao estresse a nível bioquímico, envolvendo a alocação de carboidratos não estruturais (MARTINEZ-VILALTA et al., 2016). No parâmetro das mudanças climáticas, a interação do CO₂ com temperatura, disponibilidade de água no solo, umidade do ar permite que algumas espécies modifiquem seu metabolismo com

respostas positivas, ajustando os reservatórios energéticos como mecanismos de tolerância ou aclimação ao CO₂ (WALTER et al., 2015).

Os resultados desse estudo indicam que plantas tolerantes à sombra e ao sol de *P. echinata* podem exibir maior crescimento em altura e produção de biomassa em condições climáticas de elevada concentração de CO₂ (580-936 ppm) combinado com temperaturas mais altas (30-35°C) e maior demanda evaporativa (DPV: 1.2-2.4 KPa), previstos para o final do século XXI para região Sudeste de domínio da floresta Atlântica, Brasil.

9. CONCLUSÕES

Plantas dos ecotipos tolerantes à sombra e ao sol de *P. echinata* obtiveram maior crescimento sob condições de aumento da [CO₂], tolerando os cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5), por meio de ajustes no crescimento e trocas gasosas. Os resultados refutam as hipóteses que o ecotipo tolerante a sombra seja mais vulnerável do que o ecotipo tolerante ao sol nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5).

Existe uma tendência do ecotipo tolerante ao sol ser mais eficiente no uso da água com menor umidade no substrato, evidente com o aumento da eficiência do uso da água associada à eficiência de carboxilação e aumento da concentração intracelular de carbono. Os resultados indicam que nos próximos cem anos, em regiões quentes do Brasil, é possível que o aumento da [CO₂] possa incrementar o crescimento dos dois ecotipos de *P. echinata*, mesmo com deficiência hídrica do solo.

Os dois ecotipos não sofreram estresse hídrico nos cenários de mudanças climáticas (RCP 4.5 e 8.5) mostrando que elevações na [CO₂] podem melhorar o desempenho fotossintético de suas plantas mesmo sob menor umidade do substrato, indicando que nos próximos cem anos, regiões que apresentarem essas ambientais poderão ser propícias para a expansão de populações dos ecotipos tolerante a sombra e ao sol de *P. echinata*.

A disponibilidade hídrica apresentou maior influência nos teores de polímeros de parede celular, em relação aos cenários. Nas plantas dos dois ecotipos, o teor de hemicelulose apresentou diferença não significativa em todos cenários. Nas plantas do ecotipo tolerante ao sol cultivadas no cenário RCP 8.5, o teor de celulose sofreu reduções, independentemente da disponibilidade hídrica. Em relação às plantas cultivadas no cenário atual, o teor de lignina dos dois ecotipos, em plantas cultivadas nos cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, não foi afetado pelas condições climáticas.

A elevada [CO₂] provavelmente tem um “efeito tampão” nos dois ecotipos, aumentando o crescimento e a fotossíntese, evitando redução na biomassa das plantas. Essas respostas refletiram em maior mobilização de carboidratos nos órgãos vegetativos, principalmente amido e sacarose, nas plantas cultivadas sob restrição hídrica. Os resultados sugerem que as plantas dos dois ecotipos de *P. echinata* responderão positivamente as mudanças climáticas, aumentando a alocação de carboidratos em condições atmosféricas com elevada [CO₂], favorecendo a realização de ajuste osmótico nessas condições.

Este estudo servirá de suporte para alguns desafios relacionados ao cultivo de pau-brasil em condições ambientais futuras, uma vez que os ecotipos, tolerante a sombra e tolerante ao sol, melhoraram o desempenho fotossintético em condições de elevada [CO₂], independentemente da temperatura, DPV e disponibilidade hídrica.

10. MATERIAL SUPLEMENTAR

Tabela S1. Análise de variância do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha pequena (tolerante a sombra)				
Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Altura do caule				8,08
<i>F</i>	47,78	249,91	5,12	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,013*	
Massa seca total				11,45
<i>F</i>	7,83	70,83	4,02	
<i>P</i>	0,002	0,000	0,031*	
Número de foliólulos				4,1
<i>F</i>	675,03	1398,32	155,69	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,000*	
Área foliar total				12,67
<i>F</i>	16,81	87,58	2,51	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,102*	
Taxa de crescimento relativo				6,88
<i>F</i>	8,13	86,82	4,11	
<i>P</i>	0,002	0,000	0,029*	
Taxa assimilatória líquida				8,19
<i>F</i>	6,42	54,16	2,97	
<i>P</i>	0,005	0,000	0,070*	
Assimilação de CO ₂				12,64

<i>F</i>	67,79	136,78	26,32	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,008*	
Condutância estomática				17,62
<i>F</i>	73,39	86,85	0,405	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,671*	
Transpiração				17,28
<i>F</i>	62,43	110,67	0,737	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,488*	
Concentração intercelular de C				11,81
<i>F</i>	30,39	69,97	7,12	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,003*	
Eficiência de carboxilação				23,24
<i>F</i>	5,94	1,25	8,46	
<i>P</i>	0,007	0,274	0,001*	
Eficiência do uso da água				13,95
<i>F</i>	150,23	21,43	9,63	
<i>P</i>	0,000	0,001	0,008*	

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no substrato e a interação entre cenário climático e umidade no substrato como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

Tabela S2. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha média (tolerante ao sol) de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha média (tolerante ao sol)				
Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Altura do caule				4,72
<i>F</i>	152,42	315,79	2,3	
<i>P</i>	0,000	0,000	0,121*	
Massa seca total				12,43
<i>F</i>	4,13	29,54	3,86	
<i>P</i>	0,028	0,001	0,034*	
Número de foliólulos				7,91
<i>F</i>	74,44	200,56	28,28	
<i>P</i>	0,005	0,000	0,004*	
Área foliar total				15,56
<i>F</i>	5,15	40,08	2,11	
<i>P</i>	0,013	0,002	0,144*	
Taxa de crescimento relativo				7,58
<i>F</i>	3,23	26,71	2,85	
<i>P</i>	0,057	0,002	0,077*	
Taxa assimilatória líquida				9,15
<i>F</i>	4,62	33,26	4,37	
<i>P</i>	0,021	0,006	0,024*	
Assimilação de CO ₂				14,96
<i>F</i>	86,19	63,41	2,29	

<i>P</i>	0,000	0,000	0,122*	
Condutância estomática				19,5
<i>F</i>	1,38	51,75	2,03	
<i>P</i>	0,271	0,000	0,152*	
Transpiração				16,2
<i>F</i>	0,43	36,62	1,64	
<i>P</i>	0,638	0,000	0,214*	
Concentração intercelular de C				12,22
<i>F</i>	98,82	167,54	48,05	
<i>P</i>	0,002	0,002	0,004*	
Eficiência de carboxilação				16,57
<i>F</i>	4,54	1,21	9,64	
<i>P</i>	0,021	0,283	0,008*	
Eficiência do uso da água				19,46
<i>F</i>	27,39	8,46	4,94	
<i>P</i>	0,000	0,007	0,015*	

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no substrato e a interação entre cenário climático e umidade no substrato como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

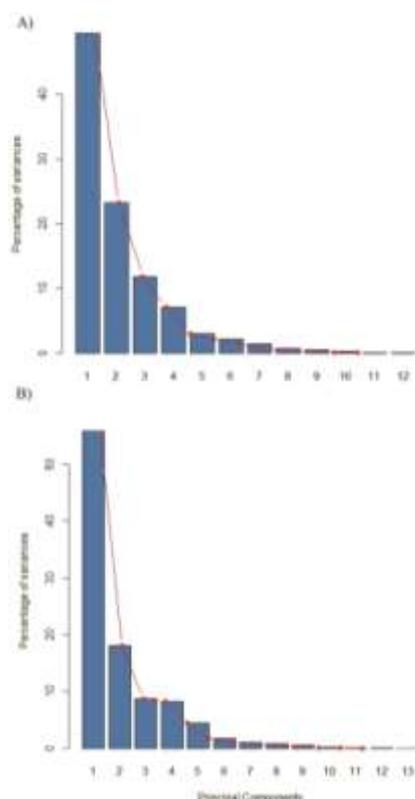


Figura S1. Porcentual da variância explicada pelos componentes principais: A) ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) e B) ecotipo folha média (tolerante ao sol).

Tabela S3. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha pequena (tolerante a sombra)

Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Ψ_w				10.25
F	12.20	41.74	2.07	
P	0.00	0.00	0.17*	
CWSIa				10.00
F	53.53	170.47	16.76	
P	0.00	0.00	0.00*	
CWSIb				4.88
F	22.15	43.12	66.82	
P	0.90	0.20	0.03*	
CWSIc				9.75
F	162.14	8.42	3.95	
P	0.00	0.01	0.04*	
F_v/F_m				11.67
F	4.83	4.07	1.73*	
P	0.02	0.06	0.22	
F_v/F_0				21.56
F	7.67	6.01	2.91	
P	0.00	0.03	0.09*	
PI_{ABS}				35.79
F	12.52	7.67	8.50	
P	0.00	0.01	0.00	
DI_0/RC				44.19
F	3.27	2.66	1.16	
P	0.07	0.12	0.34	
ET_0/RC				6.22
F	4.05	2.16	1.46	
P	0.04	0.16	0.27	
TR_0/RC				14.56
F	6.46	6.42	1.73	
P	0.01	0.02	0.21	
ABS/RC				23.70
F	6.54	6.11	1.89	
P	0.01	0.03	0.19	
V_j				7.79
F	11.65	3.25	3.77	
P	0.00	0.09	0.05	
V_i				9.31
F	4.42	1.22	1.93	
P	0.02	0.00	0.14	
M_0				24.23
F	7.38	4.83	1.99	
P	0.00	0.04	0.17	

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no substrato e a interação entre cenário climático e umidade no substrato como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

Tabela S4. Análise de variância das variáveis ecofisiológicas do ecotipo folha média (tolerante ao sol) de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha média (tolerante ao sol)				
Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Ψ_w				19.6
<i>F</i>	3.05	39.94	2.67	
<i>P</i>	0.08	0.00	0.11*	
CWSIa				9.91
<i>F</i>	37.73	485.56	8.12	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.05*	
CWSIb				12.26
<i>F</i>	38.57	108.55	2.50	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.12*	
CWSIc				9.02
<i>F</i>	19.63	89.28	138.49	
<i>P</i>	0.14	0.06	0.00*	
F_v/F_m				3.55
<i>F</i>	2.12	7.71	3.52	
<i>P</i>	0.16	0.01	0.06*	
F_v/F_0				10.97
<i>F</i>	2.22	8.07	4.07	
<i>P</i>	0.15	0.01	0.04*	
PI_{ABS}				31.34
<i>F</i>	2.36	3.18	2.13	
<i>P</i>	0.13	0.09	0.16	
DI_0/RC				24.44
<i>F</i>	1.59	7.25	2.39	
<i>P</i>	0.24	0.01	0.13	
ET_0/RC				10.66
<i>F</i>	0.33	3.66	0.14	
<i>P</i>	0.72	0.07	0.86	
TR_0/RC				10.43
<i>F</i>	0.91	5.32	1.23	
<i>P</i>	0.42	0.03	0.32	
ABS/RC				13.95
<i>F</i>	1.28	6.59	1.83	
<i>P</i>	0.31	0.02	0.20	
V_j				5.98
<i>F</i>	1.97	0.11	0.78	
<i>P</i>	0.18	0.74	0.47	
V_i				7.81
<i>F</i>	3.21	1.82	1.21	
<i>P</i>	0.00	0.02	0.22	
M_0				13.92

<i>F</i>	1.53	3.62	1.42
<i>P</i>	0.25	0.08	0.27

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no substrato e a interação entre cenário climático e umidade no substrato como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

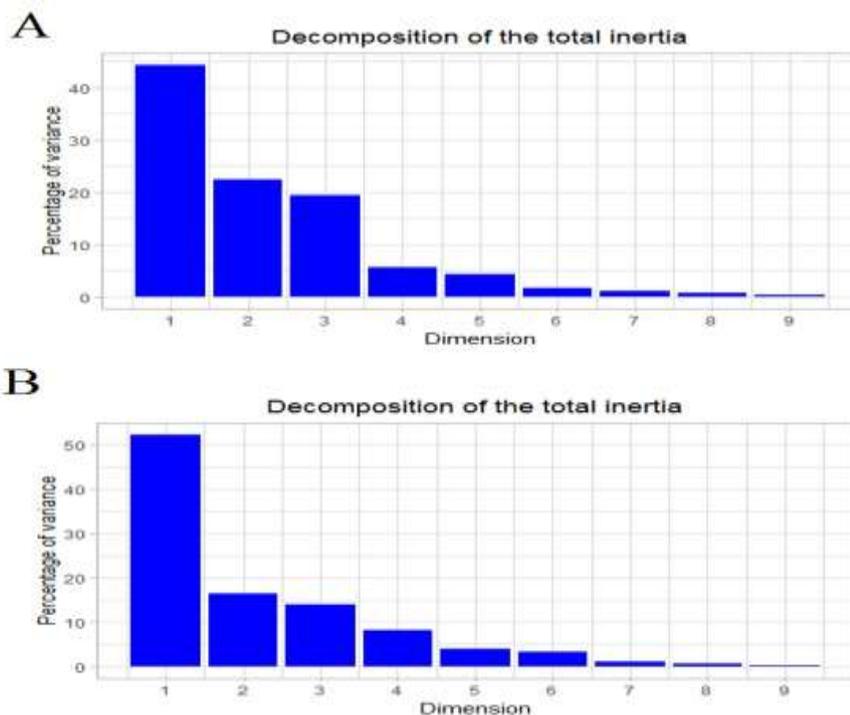


Figura S2. Porcentagem da variância explicada pelos componentes principais: A) ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) e B) ecotipo folha média (tolerante ao sol) de *P. echinata*.

Tabela S5. Análise de variância dos carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra de *P. echinata* aos 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha pequena (tolerante a sombra)				
Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Celulose				19.45
<i>F</i>	0.21	0.00	6.17	
<i>P</i>	0.80	0.97	0.00*	
Hemicelulose				4.75
<i>F</i>	0.40	4.05	0.74	
<i>P</i>	0.67	0.05	0.48*	
Lignina				9.89
<i>F</i>	4.42	1.72	1.46	
<i>P</i>	0.02	0.20	0.25*	
Glicosefolha				11.95
<i>F</i>	109.55	288.94	301.9	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Glicosecaule				3.46

<i>F</i>	162.53	10.59	140.64	
<i>P</i>	0.00	0.06	0.00*	
Glicoseraiz				7.22
<i>F</i>	7.16	43.56	237.17	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Amidofolha				42.19
<i>F</i>	2.50	0.34	0.95	
<i>P</i>	0.12	0.56	0.41	
Amidocaule				16.92
<i>F</i>	27.87	37.91	12.01	
<i>P</i>	0.03	0.04	0.01*	
Amidoraiz				13.33
<i>F</i>	17.67	5.84	24.27	
<i>P</i>	0.00	0.03	0.00*	
Sacarosefolha				12.23
<i>F</i>	78.15	330.29	86.34	
<i>P</i>	0.01	0.00	0.00*	
Sacarosecaule				12.46
<i>F</i>	220.40	115.23	398.28	
<i>P</i>	0.00	0.01	0.00*	
Sacaroseraiz				22.07
<i>F</i>	6.87	49.24	48.92	
<i>P</i>	0.01	0.00	0.00*	
Frutosefolha				5.45
<i>F</i>	992.21	792.39	1050.36	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Frutosecaule				7.83
<i>F</i>	224.66	238.19	456.13	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Frutoseraiz				4.58
<i>F</i>	102.68	455.16	794.81	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
CSTfolha				31.67
<i>F</i>	19.32	31.41	28.96	
<i>P</i>	0.01	0.15	0.02*	
CSTcaule				9.99
<i>F</i>	315.78	139.73	575.64	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
CSTraiz				3.49
<i>F</i>	3.45	572.32	1494.21	
<i>P</i>	0.06	0.00	0.00*	

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no solo e a interação entre cenário climático e umidade no solo como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

Tabela S6. Análise de variância dos carboidratos não estruturais e polímeros de parede celular do ecotipo folha pequena (tolerante a sombra) de *P. echinata* 90 dias de exposição aos cenários climáticos e umidade do substrato.

Ecotipo folha pequena (tolerante a sombra)				
Variável resposta	Cenário climático	Umidade do substrato	Interação	CV(%)
Celulose				19.14
<i>F</i>	19.67	9.60	1.56	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.23*	
Hemicelulose				5.18
<i>F</i>	2.23	0.07	0.13	
<i>P</i>	0.13	0.79	0.88*	
Lignina				15.7
<i>F</i>	4.17	2.14	0.32	
<i>P</i>	0.02	0.15	0.72*	
Glicosefolha				9.14
<i>F</i>	135.16	15.41	94.25	
<i>P</i>	0.00	0.02	0.00*	
Glicosecaule				5.37
<i>F</i>	176.11	35.77	276.96	
<i>P</i>	0.00	0.06	0.00*	
Glicoseraiz				4.68
<i>F</i>	880.16	13.38	486.28	
<i>P</i>	0.00	0.03	0.00*	
Amidofolha				45.06
<i>F</i>	2.86	0.00	6.58	
<i>P</i>	0.09	0.94	0.01*	
Amidocaule				13.96
<i>F</i>	146.16	20.22	8.44	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Amidoraiz				15.07
<i>F</i>	5.51	117.39	44.27	
<i>P</i>	0.02	0.00	0.00*	
Sacarosefolha				7.94
<i>F</i>	0.49	18.25	169.37	
<i>P</i>	0.62	0.00	0.00*	
Sacarosecaule				17.59
<i>F</i>	122.98	98.25	46.96	
<i>P</i>	0.00	0.03	0.02*	
Sacaroseraiz				19.45
<i>F</i>	23.56	0.03	38.06	
<i>P</i>	0.00	0.85	0.00*	
Frutosefolha				4.28
<i>F</i>	167.66	6.56	804.51	
<i>P</i>	0.00	0.02	0.00*	
Frutosecaule				6.45

<i>F</i>	169.51	782.68	235.83	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
Frutoseiraiz				5.50
<i>F</i>	759.68	33.14	487.18	
<i>P</i>	0.00	0.09	0.00*	
CSTfolha				47.10
<i>F</i>	0.97	0.07	4.84	
<i>P</i>	0.40	0.78	0.02*	
CSTcaule				5.98
<i>F</i>	1021.85	955.31	411.32	
<i>P</i>	0.00	0.00	0.00*	
CSTraiz				4.74
<i>F</i>	400.58	6.12	636.32	
<i>P</i>	0.00	0.02	0.00*	

Todas as variáveis foram analisadas por ANOVA, considerando cenário climático, umidade no solo e a interação entre cenário climático e umidade no solo como fatores fixos. * = significativo a 5% de probabilidade; ns = não significativo; CV% = coeficiente de variação

11. REFERÊNCIAS

- ADAMS, W.W.; MULLER, O.; COHU, C.M.; DEMMING-ADAMS, B. May photoinhibition be a consequence, rather than a cause of limited plant productivity? *Photosynth Res* 117:31–44, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9849-7>
- AINSWORTH, E. A.; ROGERS, A. The response of photosynthesis and stomatal conductance to rising [CO₂]: mechanisms and environmental interactions. **Plant, Cell and Environment**, v. 30, p. 258–270, 2007. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2007.01641.x>.
- AMARAL, L.I.V.; GASPAR, M.; COSTA, P.M.F.; AIDAR, M.P.M.; BUCKERIDGE, M.S. Novo método enzimático rápido e sensível de extração e dosagem de amido em materiais vegetais. **Hoehnea**, v. 34, p. 425-431, 2007.
- AMARAL, G.C., PEZZOPANE, J.E.M., NÓIA JÚNIOR, R.S., FONSECA, M.D.S., TOLEDO, J.V., XAVIER, T.M.T., OLIVEIRA, B.S., MARTÍNEZ, M.F., JERÔNIMO JÚNIOR, R.A.C., GONÇALVES, E.O. Ecophysiology of *Pilocarpus microphyllus* in response to temperature, water availability and vapour pressure deficit. **Trees**. 35, 543–555, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00468-020-02055-x>.
- ARENQUE, B.C.; GRANDIS, A.; POCIUS, O.; SOUZA, A.P.; BUCKERIDGE, M.S. Responses of *Senna reticulata*, a legume tree from the Amazonian flood plains, to elevated atmospheric CO₂ concentration and water logging. **Trees**, 28:1021-1034, 2014. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1015-0>.
- AVILA, R.T.; ALMEIDA, W.L.; COSTA, L.C.; MACHADO, K.L.G.; BARBOSA, M.L.; SOUZA, R.P.B.; MARTINO, P.B.; JUAREZ, M.A.T.; MARÇAL, D.M.S.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.D.C.; DaMATTA, F.M. Elevated air [CO₂] improves photosynthetic performance and alters biomass accumulation and partitioning in drought-tressed coffee plants. **Environmental and Experimental Botany**, 177:104-137, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2020.104137>.
- BAKER, N.R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo. **Annu Rev Plant Biol**, 59:89–111, 2008.

- BARROS, W.S., DIAS, L.A.S. **Biometria experimental**. Editora UFV, Viçosa, pp. 135–159, 2009.
- BRENDEL, O.; LOSETTA, P.P.M.G.; STEWART, D. A rapid and simple method to isolate pure alpha cellulose. **Phytochemistry Annal**, v. 11, p. 7-10, 2000.
- BUCKERIDGE, M. S.; CAVALARI, A. A.; SILVA, G. B. Parede Celular. In: KERBAUY, G. B. (Ed.). **Fisiologia Vegetal**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, p. 165-181. 2008.
- BUENO, E. **Pau-brasil**. Axis Mundi, São Paulo. 280 pp. 2002.
- CAI, C., LI, G., YANG, H., YANG, J., LIU, H., PAUL, C.S., ZHU, J., Do all leaf photosynthesis parameters of rice acclimate to elevated CO₂, elevated temperature, and their combination, in FACE environments? *Glob. Change Biol.* 24, 1685–1707, 2018. <https://doi.org/10.1111/gcb.14830>.
- CERNUSAK, L. A. Gas exchange and water-use efficiency in plant canopies. **Plant Biology**, p. 1–16, 2018. <https://doi.org/10.1111/plb.12939>.
- CERNUSAK, L. A.; WINTER, K.; DALLING, J.W; HOLTUM, J. A. M.; JARAMILLO, C.; KÖRNER, C.; LEAKEY, A. D. B.; NORBY, R. J.; POULTER, B. TURNER, B. L.; WRIGHT, S. J. Respostas das florestas tropicais ao aumento do CO₂ atmosférico: conhecimento atual e oportunidades para futuras pesquisas. **Functional Plant Biology**, v. 40, n. 6, p. 531-551, 2013. doi: 10.1071 / fp12309.
- CHOAT, B., JANSEN, S., BRODRIBB, T. et al. Global convergence in the vulnerability of forests to drought. **Nature**, 491, 752–755, 2012.
- CORDEIRO, Y.E.M.; TAVARES, F.B.; NASCIMENTO, A.W.S.; PENA, H.W.A. Aspectos bioquímicos de plantas jovens de açaízeiro (*Euterpe oleraceae*) sob dois regimes hídricos na Amazônia Oriental. **Biota Amazônica**, Macapá, v. 7, n. 3, p. 52-56, 2017.
- DING, Y., ZHANG, Y., ZHENG, Q. AND MELVIN, T. T. Pressure volume curves: revisiting the impact of negative turgor during cell collapse by literature review and simulations of cell micromechanics. **New Phytologist**, 203: 378–387, 2014.
- DOS SANTOS, W.D.; FERRARESE, M.L.; NAKAMURA, C.V.; MOURÃO, K.S.M. MANGOLIN, C.A.; FERRARESE-FILHO, O. Soybean (*Glycine max*) root lignification induced by ferulic acid. The possible mode of action. **Journal of Chemical Ecology**, v. 34, p. 1230-1241, 2008.
- ESSER, L; SARAIVA, D; JARENKOW, J. Future uncertainties for the distribution and conservation of *Paubrasilia echinata* under climate change. **Acta Botanica Brasilica** - 33(4): 770-776, 2019.
- FAHAD, S.; BAJWA, A. A.; NAZIR, U.; ANJUM, S. A.; FAROOQ, A.; ZOHAIB, A.; SADIA, S.; NASIM, W.; ADKINS, S.; SAUD, S.; IHSAN, M. Z.; ALHARBY, H.; ADKINS, S.; WU, C.; WNAG, D.; HUANG, J. Crop production under drought and heat stress: Plant responses and management options. **Frontiers in Plant Science**, v.8, 2017.
- FARIA-SILVA, L., GALLON, C.Z., PURGATTO, E., SILVA, D.M. Photochemical metabolism and fruit quality of Ubá mango tree exposed to combined light and heat stress in the field. **Acta Physiol. Plant.** 39, 238, 2017. <https://doi.org/10.1007/s11738-017-2533-3>.

- FARIA-SILVA, L., GALLON, C.Z., FILGUEIRAS, P.R., SILVA, D.M. Irrigation improves plant vitality in specific stages of mango tree development according to photosynthetic efficiency. **Photosynthetica**, 57, 820–829, 2019. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.091>.
- FASEELA, P., SINISHA, A.K., BRESTIČ, M., PUTHUR, J.T. Chlorophyll a fluorescence parameters as indicators of a particular abiotic stress in rice. **Photosynthetica**, 57, 108–115, 2019. <https://doi.org/10.32615/ps.2019.147>.
- FILHO, J. T. C.; SERAPHIN, E. S. Alteração no potencial osmótico e teor de carboidratos solúveis em plantas jovens de lobeira (*Solanum lycocarpum* St.-Hil.) em resposta ao estresse hídrico. **Revista Brasileira de Botânica** v. 24, p. 199-204, 2001.
- FINEGAN, B. Forest succession. *Nature* 312, 109–114, 1984.
- FONSECA, C.L.S. Respostas fotossintéticas e dinâmica de carbono em plantas de dois morfotipos de *Paubrasilia echinata* sob estresse hídrico seguido de reidratação. Universidade Federal do Espírito Santo. **Tese de doutorado**, 2021.
- FREIRE JC, RIBEIRO MAV, BAHIA VG, LOPES AS, AQUINO LH. Respostas do milho cultivado em casa de vegetação a níveis de água em solos da região de Lavras (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 4:5–8, 1980.
- GARCÍA-TEJERO, I.F.; COSTA, J.M.; EGIPTO, R.; DURAN-ZUAZO, V.H.; LIMA, R.S.N.; LOPES, C.M.; CHAVES, M.M. Thermal data to monitor cropwater status in irrigated Mediterranean viticulture. **Agric Water Manag**, 176:80–90, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.05.008>
- GRACE, J., MITCHARD, E. & GLOOR, E. Perturbations in the carbon budget of the tropics. **Global Change Biology**, 20(10), 3238-3255, 2014. <https://doi.org/10.1111/gcb.12600>.
- GAGNON E., BRUNEAU A., HUGHES C. E., QUEIROZ L. P., LEWIS G. P. A new generic system for the pantropical Caesalpiniagroup (Leguminosae). **PhytoKeys**, 71: 1–160, 2016. <https://doi.org/10.3897/phytokeys.71.9203>.
- GAMA, V.N. Caracterização morfofisiológica e bioquímica de três morfotipos de *Paubrasilia echinata* Lam. Exposta a condições de irradiância. Tese (Doutorado em Biologia Vegetal) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2017.
- GAMA, V. N.; MACIEIRA, B. P. B.; ZANETTI, L. V.; FANTINATO, D. E.; XAVIER, T. M. T.; PEZZOPANE, J. E. M.; CUZZUOL, G. R. F. Ecophysiological responses of medium morphotype of *Paubrasilia echinata* (Lam.) Gagnon, H. C. Lima and G. P. Lewis raised under full sunlight and natural shade. **Revista Árvore**, 43(4), 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1806-90882019000400007>.
- GAMA, V. N.; ZANETTI, L. V.; WERNER, E. T.; PEZZOPANE, J. E. M.; CUZZUOL, G. R. F. UV-B effects on growth, photosynthesis, total antioxidant potential and cell wall components of shade-tolerant and sun-tolerant ecotypes of *Paubrasilia echinata*. **Flora**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.flora.2020.151679>.
- HARTLEY, H.O. The use of range in analysis of variance. **Biometrika**. 37, 271–280, 1950.
- HAYERD, V.; SMITH, B.; CANADELL, J.G.; CUNTZ, M.; MIKALOFFFLETCHER, S.; FARQUHAR, G.; WOODGATE, W.; BRIGGS, P.R.; TRUDINGER, C.M. Higher than expected CO₂ fertilization inferred from leaf to global observations. **Global Change Biology**. 00:1–13, 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.14950>.

HUNT, R. **Plant growth curves**: the functional approach to plant growth analysis. Edward Arnold Publishers, London, UK, 1982.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis). Portaria do Ministério do Meio Ambiente (MMA) nº 37, de 03 de abril de 1992. Reconhece como Lista Oficial de Espécies da Flora Brasileira Ameaçadas de Extinção a relação que se apresenta. <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=95519>.

IDSO, S.B. Non-water-stressed baselines: a key to measuring and interpreting plant water stress. **Agric Meteorol**, 27:59–70, 1982.

IPCC (AR5). In T. F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (Eds.), **Climatechange 2013: The physicalsciencebasis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** (p. 1535). Cambridge, UK and New York, NY: Cambridge University Press. 2013.

IPCC. **Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151 p., 2014.

IPCC. Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the Impacts of Global Warming of 1.5°C Above Pre-Industrial Levels and Related Global Greenhouse Gas Emission Pathways, in the Context of Strengthening the Global Response to the Threat of Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty. eds V. P. Masson-Delmotte et al. (Cambridge: Cambridge University Press), 2018.

JIAO, X.C.; SONG, X.M.; ZHANG, D.L.; DU, Q.J.; LI, J.M. Coordination between vapor pressure deficit and CO₂ on the regulation of photosynthesis and productivity in greenhouse tomato production. **Scientific Reports**, 9(1), 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-45232-w>.

JUCHUM, F. S.; COSTA, M. A.; AMORIM, A. M.; CORRÊA, R. X. Phylogenetic relationships among morphotypes of *Caesalpinia echinata* Lam. (Caesalpinioideae: Leguminosae) evidenced by trnL intron sequences. **Naturwissenschaften**. 95, 1085–1091, 2008. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0424-6>.

LEAKEY, A. D. B.; AINSWORTH, E. A.; BERNACCHI, C. J.; ROGERS, A.; LONG, S. P.; ORT, D. R. Elevated CO₂ effects on plant carbon, nitrogen, and water relations: six important lessons from FACE. **Journal of Experimental Botany**, 60(10), 2859–2876, 2009. <https://doi.org/10.1093/jxb/erp096>.

LE GALL, H., PHILIPPE, F., DOMON, J. M., GILLET, F., PELLOUX, J., & RAYON, C. Cell Wall Metabolism in Response to Abiotic Stress. *Plants* (Basel, Switzerland), 4(1), 112–166. 2015.

LONGUI, E.L., LOMBARDI, D.R., ALVES, E.S. Potential Brazilian wood species for bows of string instruments. **Holzforschung**, 64, 511–520, 2010. <https://doi.org/10.1515/HF.2010.068>.

MARÇAL, D.M.S.; AVILA, R.T.; QUIROGA-ROJAS, L.F.; SOUZA, R.P.B.; GOMES JUNIOR, C. C.; PONTE, L.R.; BARBOSA, M.L.; OLIVEIRA, L.A.; MARTINS, S.C.V.; RAMALHO, J.D.C.; DaMATTA, F.M. Elevated [CO₂] benefits coffee growth

and photosynthetic performance regardless of light availability. **Plant Physiology Biochemistry**, 158, 524–535, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2020.11.042>.

MARTINELLI, G., MORAES, M.A. Livro vermelho da Flora do Brasil. 1. ed. - Rio de Janeiro. Instituto de Pesquisas Jardim Botânico do Rio de Janeiro. 1102p., 2013.

MARTINEZ-VILALTA, J., SALA, A., ASENSIO, D., GALIANO, L., HOCH, G., PALACIO, S., PIPER, F., FRANCISCO, L. Dynamics of non-structural carbohydrates in terrestrial plants: A global synthesis. *Ecological Monographs*. 86. 10.1002/ecm.1231. 2016.

MENDES, K.R.; MARENCO, R.A.; NASCIMENTO, H.C.S. Velocidade de carboxilação da RuBisCO e transporte de elétrons em espécies arbóreas em resposta a fatores do ambiente na Amazônia Central. **Ciência Florestal**, Santa Maria, 27(3), 947-959, 2017.

MENGARDA, L. H. G.; MILANEZ, C. R. D.; SILVA, D. M.; AGUILAR, M. A. G.; CUZZUOL, G. R. F. Morphological and physiological adjustments of brazilwood (*Caesalpinia echinata* Lam.) to direct solar radiation. **Brazilian Journal of Plant Physiology**, 24(3), 161-172, 2012.

MENGARDA, L. H. G.; SOUZA, R. L. F.; CAMPOSTRINI, E.; REIS, F. O.; VENDRAME, W. A.; CUZZUOL, G. R. F. Light as an indicator of ecological succession in brazilwood (*Caesalpinia echinata* Lam.). **Brazilian Journal of Plant Physiology**, 21, 55-64, 2009.

MERGANIČOVÁ KATARÍNA; JÁN MERGANIČ; ALEKSI LEHTONEN; GIORGIO VACCHIANO; MAŠA ZORANA OSTROGOVIĆ SEVER; ANDREY L. D. AUGUSTYNCZYK; RÜDIGER GROTE; INA KYSELOVÁ; ANNIKKI MÄKELÄ; RASOUL YOUSEFPOUR; JAN KREJZA; ALESSIO COLLALTI; CHRISTOPHER P.O. REYER. Forest carbon allocation modelling under climate change. **Tree Physiology**, 2019.

NEVES, L.H.; SANTOS, R. I. N.; TEIXEIRA, G. I. S.; ARAUJO, D. G.; SILVESTRE, W. V. D.; PINHEIRO, H. A. Leaf gas exchange, photochemical responses and oxidative damages in assai (*Euterpe oleracea* Mart.) seedlings subjected to high temperature stress. **Scientia Horticulturae**, v. 257, p. 108733, 2019.

NÓIA JÚNIOR, R. S.; PEZZOPANE, J. E. M.; VINCO, J. S.; XAVIER, T. M. T.; CECÍLIO, R. A.; PEZZOPANE, J. R. M. Characterization of photosynthesis and transpiration in two rubber tree clones exposed to thermal stress. **Brazilian Journal of Botany**, v. 41, p. 785-794. 2018b. <https://doi.org/10.1007/s40415-018-0495-3>.

NÓIA JÚNIOR, R. S.; AMARAL, G. C.; PEZZOPANE, J. E. M.; TOLEDO, J. V.; XAVIER, T. M. T. Ecophysiology of C3 and C4 plants in terms of responses to extreme soil temperatures. **Theoretical Experimental Plant Physiology**, v. 30, p. 261-274, 2018a. <https://doi.org/10.1007/s40626-018-0120-7>.

NÓIA JÚNIOR, R.S.; AMARAL, G.C.; PEZZOPANE, J.E.M.; FONSECA, M.D.S.; SILVA, A.P.C.; XAVIER, T.M.T. Ecophysiological acclimatization to cyclic water stress in *Eucalyptus*. **Journal of Forestry Research**, 31(3):797–806, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11676-019-00926-9>.

OSAKABE, Y., OSAKABE, K., SHINOZAKI, K., TRAN, L.S.P. Response of plants to water stress. **Front. Plant Sci.** 5, 2014. <https://doi.org/10.3389/fpls.2014.00086>.

- PILON, CRISTIANE; SNIDER, JOHN L; SOBOLEV, VICTOR; CHASTAIN, DARYL R; SORENSEN, RONALD B; MEEKS, CALVIN D; MASSA, ALICIA N; WALK, TRAVIS; SINGH, BHUPINDER; EARL, HUGH J. Assessing stomatal and non-stomatal limitations to carbon assimilation under progressive drought in peanut (*Arachis hypogaea* L.). **Journal of Plant Physiology**, 231: 124–134. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2018.09.007>.
- PIROVANI, D.B., PEZZOPANE, J.E.M., XAVIER, A.C., PEZZOPANE, J.R.M., DE JESUS JÚNIOR, W.C., MACHUCA, M.A.H., DOS SANTOS, G.M.A.D.A., DA SILVA, S.F., DE ALMEIDA, S.L.H., DE OLIVEIRA PELUZIO, T.M., EUGENIO, F.C., MOREIRA, T.R., ALEXANDRE, R.S., DOS SANTOS, A.R., Climate change impacts on the aptitude area of forest species. **Ecol. Indic.**, 95, 405–416, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.08.002>
- POLLOCK, C. J. Tansley review no. 5 fructans and the metabolism of sucrose in vascular plants. **New Phytologist**, v. 104, n. 1, p. 1-24, 1986.
- POORTER, H. Interspecific variation in relative growth rate: on ecological causes and physiological consequences. In: Lambers H (ed) Causes and consequences of variation in growth rate. SPB Academic Publishing, The Hague, pp 45–68, 1989.
- POORTER, L., WRIGHT, S.J., PAZ, H., ACKERLY, D.D., CONDIT, R., IBARRA-MANRÍQUEZ, G., HARMS, K.E., LICONA, J.C., MARTÍNEZ-RAMOS, M., MAZER, S.J., MULLER-LANDAU, H.C., PEÑA-CLAROS, M., WEBB, C.O., WRIGHT, I.J. Are functional traits good predictors of demographic rates? Evidence from five Neotropical forests. **Ecology**, 89 (7), 1908–1920, 2008.
- POORTER, L.; MCDONALD, I.; ALARCÓN, A.; FICHTLER, E.; LICONA, J.; PEÑA-CLAROS, M.; STERCK, F.; VILLEGAS, Z.; SASS-KLAASEN, U. The importance of wood traits and hydraulic conductance for the performance and life history strategies of 42 rainforest tree species. **New Phytologist**, v. 185, p. 481-492, 2010. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2009.03092.x>.
- POPP, M., LIED, W., MEYER, A.J., RICHTER, A., SCHILLER, P., SCHWITTE, H. Sample preservation for determination of organic compounds: microwave versus freeze-drying. **J. Exp. Bot.** 47, 1469–1473, 1996. <https://doi.org/10.1093/jxb/47.10.1469>.
- PORTES, M.T., DAMINELI, D.S.C., RIBEIRO, R.V., MONTEIRO, J.A.F., SOUZA, G.M. Evidence of higher photosynthetic plasticity in the early successional *Guazuma ulmifolia* Lam. compared to the late successional *Hymenaea courbaril* L. grown in contrasting light environments. **Brazilian Journal of Biology**, 70, 75–83, 2010.
- R CORE TEAM, 2017. R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Found. Stat. Comput. Vienna, Austria <https://www.R-project.org/>.
- ROCHA, Y.T., SIMABUKURO, E.A. Estratégias de conservação *in situ* e *ex situ* do pau-brasil. In: Pau-brasil, da Semente a Madeira Conhecer para Conservar. Eds. Ribeiro, R.C.L.F., Barbedo, C.J., Alves, E.S., Domingos, M., Braga, M.R. Instituto de Botânica, São Paulo. pp. 102–113, 2008.
- ROSSATO, D.R.; KOLB, R.M. *Gochnatia polymorpha* (Less.) Cabrera (Asteraceae) changes in leaf structure due to differences in light and edaphic conditions. **Acta Botanica Brasilica**, 24(3), 605-612, 2010.

- SCARANO, F. R.; CEOTTO, P. Brazilian Atlantic forest: impact, vulnerability, and adaptation to climate change. **Biodiversity and Conservation**, 24, 2319–2331, 2015. <https://doi.org/10.1007/s10531-015-0972-y>.
- SCHÄDEL, C.; BLÖCHL, A.; RICHTER, A.; HOCH, G. Quantification and monosaccharide composition of hemicelluloses from different plant functional types. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 48, n. 1, p. 1-8, 2010.
- SCHOLANDER, PF; HAMMEL, HT; HEMINGSSEN, EA; BRADSTREET, ED Pressão hidrostática e potenciais osmóticos em folhas de manguezais e algumas outras plantas. **Proceedings of National Academy Science**, v.51, p.119-125, 1965.
- SILVA, P.A.; COSME, V.S.; RODRIGUES, K.C.B.; DETMANN, K.S.C.; LEÃO, F.M.; CUNHA, R.L.; BUSELLI, R.A.F.; DAMATTA, F.M.; PINHEIRO, H.A. Drought tolerance in two oil palm hybrids as related to adjustments in carbon metabolism and vegetative growth. **Acta Physiologiae Plantarum**, 39(2):58, 2017. doi:10.1007/s11738-017-2354-4
- SINCLAIR, T.R.; SHEKOOFA, A.; ISLEIB, T.G.; BALOTA, M.; ZHANG, H. Identification of virginia-type peanut genotypes for water-deficit conditions based on early decrease in transpiration rate with soil drying. **Crop Science**, 58(6), 2607-2612, 2018. <https://doi.org/10.2135/cropsci2018.05.0293>.
- STRASSER, B.J; STRASSER, R.J. Measuring fast fluorescence transients to address environmental questions: the JIP-test. In: Mathis P (ed) Photosynthesis: from light to biosphere. Kluwer Academic Publishers, **Dordrecht**, pp 977–980, 1995.
- STRASSER, R.J.; SRIVASTAVA, M.; TSIMILLI-MICHAEL, M. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. In: Yunus M, Pathre U, Mohanty P (eds) Probing photosynthesis: mechanisms, regulation and adaption. Taylor & Francis, London, pp 445–483, 2000.
- TARDIEU, F.O.; GRANIER, C.; MULLER, B. Water deficit and growth. Coordinating processes without an orchestrator? **Curr. Opin. Plant Biol**, 14, 283–289, 2011.
- VARTY, N. *Caesalpinia echinata*. The IUCN Red List of Threatened Species 1998. <https://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.1998.RLTS.T33974A9818224.en>.
- WALTER, L.C.; ROSA, H.T.; STRECK, N.A. Mecanismos de aclimação das plantas à elevada concentração de CO₂. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.45, n.9, p.1564-1571, set, 2015.
- WANG, B. WEIWEI CAIB, JIANLING LIA,C, YUNFAN WANA,, YU'E LIA, CHEN GUOD, ANDREAS WILKESA, SONGCAI YOUA, XIAOBO QINA, QINGZHU GAOA, KAIWEN LIU. Leaf photosynthesis and stomatal conductance acclimate to elevated [CO₂] and temperature thus increasing dry matter productivity in a double rice cropping system. **Field Crops Research**, 248, 2020.
- WAY, D. A.; OREN, R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. **Tree Physiology**, 30, 669-688, 2010. <https://doi.org/10.1093/treephys/tpq015>.
- WELLER, S. L.; FLORENTINE, S. K.; MUTTI, N. K.; JHA, P.; CHAUHAN, B. S. Response of *Chloris truncata* to moisture stress, elevated carbon dioxide and herbicide application. **Scientific Reports**, 9 (1), 2019. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-47237-x>.

XAVIER, T.M.T.; PEZZOPANE, J.E.M.; PEREIRA, C.L.; NÓIA JUNIOR, R.S.; CRUZ, G.P.R. Crescimento de espécies florestais da mata atlântica sob diferentes condições microclimáticas. **Re. C. E. E. F.** 30: 1–14, 2017.

YAMORI, W.; HIKOSAKA, K.; WAY, D.A. Temperature response of photosynthesis in C3, C4, and CAM plants: temperature acclimation and temperature adaptation. **Photosynth. Res.** 119, 101–117, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11120-013-9874-6>.

YU, LIUYANG; GAO, XIAODONG; ZHAO, XINING. Global synthesis of the impact of droughts on crops water-use efficiency (WUE): Towards both high WUE and productivity. **Agricultural Systems**, 177, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2019.102723>.

ZHAO, J.; HARTMANN, H.; TRUMBORE, S. High temperature causes negative whole plant carbon balance under mild drought. **New Phytol.** 200, 330–339., 2013. <https://doi.org/10.1111/nph.12400>.

ZHAO, B., MA, B., HU, Y., LIU, J. Source–sink adjustment: a mechanistic understanding of the timing and severity of drought stress on photosynthesis and grain yields of two contrasting oat (*Avena sativa* L.) genotypes. **J. Plant Growth Regul.** 2020. <https://doi.org/10.1007/s00344-020-10093-5>.

ZHOU, R., YU, X., WEN, J., JENSEN, N.B., SANTOS, T.M., WU, Z., ROSENQVIST, E., OTTOSEN, C. Interactive effects of elevated CO₂ concentration and combined heat and drought stress on tomato photosynthesis. **BMC Plant Biology**, 20:260, 2020. <https://doi.org/10.1186/s12870-020-02457-6>