

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO –CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**ADUBAÇÃO NITROGENADA E FOSFATADA E USO DE  
POTÁSSIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A DÉFICIT HÍDRICO  
EM *Acrocarpus fraxnifolius* Wight & Arn.**

Autor: Igor Olacir Fernandes Silva  
Orientador: Prof. DSc.Leandro Carlos

Rio Verde – GO  
Janeiro– 2024

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA  
GOIANO –CAMPUS RIO VERDE  
DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO PROGRAMA DE  
PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS  
AGRÁRIAS – AGRONOMIA

**ADUBAÇÃO NITROGENADA E FOSFATADA E USO DE  
POTÁSSIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A DÉFICIT HÍDRICO  
EM *Acrocarpus fraxnifolius* Wight & Arn.**

Autor: Igor Olacir Fernandes Silva  
Orientador: Prof. DSc.Leandro Carlos

Tese apresentada, como parte das exigências para a obtenção do título de DOUTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS- AGRONOMIA, no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias-Agronomia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde, Área de concentração em Produção Vegetal Sustentável no Cerrado.

Rio Verde – GO  
Janeiro– 2024

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

SSI586      Silva, Igor Olacir Fernandes  
a      ADUBAÇÃO NITROGENADA E FOSFATADA E USO DE  
POTÁSSIO NA INDUÇÃO DE RESISTÊNCIA A DÉFICIT HÍDRICO  
EM *Acrocarpus fraxnifolius* Wight & Arn. / Igor  
Olacir Fernandes Silva; orientador Leandro Carlos. -  
- Rio Verde, 2024.  
86 p.

Tese (Doutorado em Pós-Graduação em Ciências  
Agrárias) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio  
Verde, 2024.

1. fertilizantes. 2. nutrição. 3. restrição hídrica.  
4. morfofisiológicas. 5. anatomia foliar. I. Carlos,  
Leandro, orient. II. Título.



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Ata nº 27/2024 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

## ATA Nº/124

### BANCA EXAMINADORA DE DEFESA DE TESE

Ao décimo quinto dias do mês de março do ano de dois mil e vinte e quatro, às 13h30, reuniram-se os componentes da Banca Examinadora: sob a presidência do primeiro, Prof. Dr. Leandro Carlos (Presidente); Prof.ª Dr.ª Darliane de Castro Santos (Avaliadora interna); Prof. Dr. Regis Pereira Venturin (Avaliador externo); Prof. Dr. Sebastião Carvalho Vasconcelos Filho (Avaliador externo); Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Avaliador externo) em sessão pública realizada no IF Goiano – Campus Rio Verde, para procederem a avaliação da defesa de Tese, em nível de Doutorado, de autoria de **IGOR OLACIR FERNANDES SILVA**, discente do Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia do Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A sessão foi aberta pelo presidente da Banca Examinadora, Prof. Dr. Leandro Carlos (Presidente), que fez a apresentação formal dos membros da Banca. A palavra, a seguir, foi concedida ao autor da Tese para, em 40 min., proceder à apresentação de seu trabalho. Terminada a apresentação, cada membro da banca arguiu o(a) examinado(a), tendo-se adotado o sistema de diálogo sequencial. Terminada a fase de arguição, procedeu-se a avaliação da defesa. Tendo-se em vista as normas que regulamentam o Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias – Agronomia, e procedidas às correções recomendadas, a Tese foi APROVADA, considerando-se integralmente cumprido este requisito para fins de obtenção do título de **DOCTOR EM CIÊNCIAS AGRÁRIAS-AGRONOMIA**, na área de concentração Produção Vegetal Sustentável no Cerrado, pelo Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde. A conclusão do curso dar-se-á quando da entrega na secretaria do PPGCA-AGRO da versão definitiva da Tese, com as devidas correções. Assim sendo, esta ata perderá a validade se não cumprida essa condição, em até **60** (sessenta) dias da sua ocorrência. A Banca Examinadora recomendou a publicação dos artigos científicos oriundos dessa Tese em periódicos de circulação nacional e/ou internacional, após procedida as modificações sugeridas. Cumpridas as formalidades da pauta, a presidência da mesa encerrou esta sessão de defesa de Tese de Doutorado, e para constar, eu, Vanilda Maria Campos, secretária do PPGCA-AGRO, lavrei a presente Ata, que, após lida e achada conforme, será assinada pelos membros da Banca Examinadora.

Prof. Dr. Leandro Carlos (Presidente)

Prof.ª Dr.ª Darliane de Castro Santos (Avaliadora interna)

Prof. Dr. Regis Pereira Venturin (Avaliador externo)

Prof. Dr. Sebastião Carvalho Vasconcelos Filho (Avaliador Externo)

Prof. Dr. Carlos Ribeiro Rodrigues (Avaliador Externo)

Documento assinado eletronicamente por:

- Carlos Ribeiro Rodrigues, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/03/2024 16:26:50.
- Darliane de Castro Santos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/03/2024 10:10:19.
- Regis Pereira Venturin, Regis Pereira Venturin - Professor Avaliador de Banca - Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde (10651417000500), em 18/03/2024 10:09:37.
- Sebastiao Carvalho Vasconcelos Filho, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/03/2024 10:06:13.
- Leandro Carlos, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 18/03/2024 09:45:18.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 13/03/2024. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 583040  
Código de Autenticação: 4cfe9f5908



INSTITUTO FEDERAL GOIANO  
Campus Rio Verde  
Rodovia Sul Goiana, Km 01, Zona Rural, 01, Zona Rural, RIO VERDE / GO, CEP 75901-970  
(64) 3624-1000

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela vida imposta a mim e força para superar os desafios.

Aos meus pais, Maria Aparecida da Silva e Jesus Olacir Fernandes, pela dedicação, carinho, incentivo e inspiração.

Ao meu, irmão Hyago Olacir Fernandes Silva, pelo companheirismo, apoio, paciência, dedicação, cuidados, por acreditar e me fazer acreditar também que sou capaz.

A minha filha Maria Alice Fernandes Olacir, que mudou a minha concepção e pensamento sobre os processos da vida, permitindo maior comprometimento e responsabilidade no dia a dia e conseqüentemente tornando-me uma pessoa de melhor princípio e caráter.

Ao Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde e ao Programa de Pós-graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, pela oportunidade de qualificação profissional e crescimento pessoal.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e FAPEG, pela concessão da bolsa possibilitando o desenvolvimento da pesquisa.

Ao meu orientador professor Leandro Carlos, pela confiança, ensinamentos e contribuições durante todo mestrado e doutorado. A Viveiro construído com apoio de parcerias conseguidas pelo professor orientador e Laboratórios de Hidráulica e Irrigação, Ecofisiologia vegetal, Análise de Solo e Tecido Foliar e Química agrícola, pelo espaço cedido, apoio material e de equipamentos para a execução deste trabalho.

A todos os professores do PPGCA – Agronomia, pelos conhecimentos passados. E, a todos que de forma direta ou indiretamente contribuíram para a conclusão deste trabalho, como o estudante de iniciação científica Wanderson Evangelista Sousa e a estudante de doutorado Giselle Santos de Faria que participaram desta pesquisa desde a instalação, até a coleta dos dados e avaliações.

## BIOGRAFIA DO AUTOR

IGOR OLACIR FERNANDES SILVA, filho de Maria Aparecida da Silva e Jesus Olacir Fernandes, nascido em 21 de junho de 1995, na cidade de Quirinópolis, Estado de Goiás.

Em fevereiro de 2013, ingressou no curso de Bacharelado em Agronomia pelo Instituto Federal Goiano-Campus Rio Verde, graduando-se no ano de 2017.

Em março de 2017, iniciou no Mestrado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias - Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Leandro Carlos.

Em agosto de 2019, iniciou no Doutorado no Programa de Pós-Graduação em Ciências Agrárias Agronomia, no Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde, sob a orientação do Professor Dr. Leandro Carlos.

Atualmente atua como professor da Faculdade de Quirinópolis (FAQUI) e UNIASSELVI e pesquisador na área de nutrição de plantas e fitopatologia voltado para culturas anuais e espécies florestais.

## ÍNDICE

Página

ÍNDICE DE TABELAS.....	VII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES .....	XI
RESUMO GERAL.....	XIII
ABSTRACT.....	XIV
1. INTRODUÇÃO GERAL .....	XVI
2. OBJETIVOS.....	XVIII
3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	XIX
CAPÍTULO I: ADUBAÇÃO FOSFATADA EM <i>Acrocarpus fraxniniifolius</i> MART. APLICADA NO SULCO DE PLANTIO.....	1
RESUMO.....	2
ABSTRACT.....	3
1. INTRODUÇÃO .....	4
2. MATERIAL E MÉTODOS .....	5
3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	10
4. CONCLUSÕES.....	23
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	23
CAPÍTULO II: ADUBAÇÃO NITROGENADA EM <i>Acrocarpus fraxniniifolius</i> MART. APLICADA NO SULCO DE PLANTIO.....	29
RESUMO.....	30
ABSTRACT.....	31
1. INTRODUÇÃO .....	32

2. MATERIAL E MÉTODOS .....	33
3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	38
4. CONCLUSÕES.....	51
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	50
CAPÍTULO III: EFEITO DA ADUBAÇÃO DE RUSTIFICAÇÃO EM MUDAS DE <i>Acrocarpus fraxinifolius</i> SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA.....	55
RESUMO.....	56
ABSTRACT.....	57
1. INTRODUÇÃO .....	58
2.MATERIAL E MÉTODOS .....	59
3. RESULTADOS e DISCUSSÃO.....	63
3.1 Trocas gasosas, fluorescência da clorofila <i>a</i> e eficiência do uso da água .....	63
3.2 Potencial hídrico foliar.....	71
3.3 Taxa de extravasamento de eletrólitos.....	72
3.4 Índices de clorofila.....	73
3.5 Parâmetros morfológicos.....	75
4. CONCLUSÕES.....	80
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	81
CONCLUSÃO GERAL .....	86

## ÍNDICE DE TABELAS

Página

### CAPÍTULO I.

Tabela1. Características químicas da amostra de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) da área de experimental, na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm.....7

### CAPÍTULO II.

Tabela1. Características químicas da amostra de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) da área de experimental, na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm.....35

### CAPÍTULO III.

Tabela 1. Adubação de base e cobertura aplicada para produção de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* com rustificação total e parcial durante a fase de viveiro.....62

## ÍNDICE DE FIGURAS

Página

### CAPÍTULO I.

- Figura 1. Valores médios de precipitação acumulada (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) do ar durante o período de condução do plantio de plantas *Acrocarpus fraxinifolius* no campo.....6
- Figura 2. Teor de fósforo foliar (P foliar) –A; Teor de potássio foliar (K foliar) - B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....10
- Figura 2. Índice de Clorofila b – A; Índice de Clorofila a/b -B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....11
- Figura 4. Taxa fotossintética ( $A$ ) –A; Condutância estomática ( $g_s$ ) - B Taxa transpiratória ( $E$ ) –C; concentração interna de  $CO_2$  ( $C_i$ ) – D; relação entre a concentração interna e externa de  $CO_2$  ( $C_i/C_a$ ) -E; Eficiência instantânea do uso da água (EUA) -F; Eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ ) -G e Eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) -H em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....14
- Figura 5. Diâmetro de copa – A; Área foliar (AF) – B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....15
- Figura 6. Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro ao nível do solo (DNS) -B; em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 90, 120, 180 e 365 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....18
- Figura 7. Diâmetro na altura do peito (DAP) – A; Volume cilíndrico com casca ( $V_c$ )-B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 365 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....20
- Figura 8. Anatomia das folhas de *Acrocarpus fraxinifolius* 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada, sendo (A) 0 g de  $P_2O_5$  por planta, (B) 20 g de  $P_2O_5$  por planta, (C) 40 g de  $P_2O_5$  por planta, (D) 80 g de  $P_2O_5$  por planta e (E) 160 g de  $P_2O_5$  por planta. (ED) epiderme adaxial. (EB) epiderme abaxial. (PP) parênquima paliçádico. (SP) parênquima esponjoso.....22
- Figura 9. Espessura da epiderme adaxial –A; Espessura da epiderme abaxial - B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada.....23

### CAPÍTULO II.

- Figura 1. Valores médios de precipitação acumulada (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) do ar durante o período de condução do plantio de plantas *Acrocarpus fraxinifolius* no campo.....34
- Figura 2. Teor de nitrogênio foliar (N foliar) –A; Teor de potássio foliar (K foliar) – B; Teor de cálcio foliar (Ca foliar) –C; Teor de magnésio foliar (Mg foliar) – D em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o plantio em campo, em resposta a adubação nitrogenada.....39
- Figura 3. Índice de clorofila *a* -A, Índice de clorofila *b* -B; Índice de clorofila total -C, Índice de clorofila *a/b* – D em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....40
- Figura 4. Taxa fotossintética (*A*) –A; Condutância estomática (*g<sub>s</sub>*) - B Taxa transpiratória (*E*) –C; concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*)– D; relação entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>*)-E; Eficiência intrínseca do uso da água (*A/g<sub>s</sub>*)-F em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....42
- Figura 5. Diâmetro de copa- A; Área Foliar-B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....43
- Figura 6. Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro ao nível do solo (DNS) -B; em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 90, 120, 180 e 365 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....46
- Figura 7. Diâmetro na altura do peito (DAP) – A; Volume cilíndrico com casca (*V<sub>c</sub>*)-B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 365 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....48
- Figura 8. Anatomia das folhas de *Acrocarpus fraxinifolius* 180 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada, sendo (A) 0 g de N por planta, (B) 11 g de N por planta, (C) 22 g de N por planta, (D) 45 g de N por planta e (E) 90 g de N por planta. (ED) epiderme adaxial. (EB) epiderme abaxial. (PP) parênquima paliçádico. (SP) parênquima esponjoso. (A-E).....49
- Figura 9. Espessura do mesofilo foliar em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada.....50

### CAPÍTULO III.

- Figura 1. Taxa fotossintética (*A*) – (A, B); Taxa de transporte de elétrons (ETR)- (C, D) e Rendimento quântico de dissipação regulada (*Y<sub>NPQ</sub>*)- (E, F) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....65

Figura 2. Taxa transpiratória ( $E$ ) - A, Condutância estomática ( $g_s$ )-B, Eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ )-C, Fluorescência inicial ( $F_0$ )-D, Rendimento quântico potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ )- E e Rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $Y_{II}$ )-F em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....67

Figura 3. Eficiência instantânea do uso da água (EUA)- A e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ )- B em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubação de potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após transplantio.....70

Figura 4. Coeficiente de dissipação fotoquímica ( $q_P$ )- (A; B) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....71

Figura 5. Potencial hídrico foliar na antemanhã ( $\Psi_{wam}$ )- A e Potencial hídrico foliar ao meio-dia ( $\Psi_w$  12:00)- B em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....72

Figura 6. Taxa de liberação de eletrólitos (TLE) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....73

Figura 7. Índice de clorofila a -A, Índice de clorofila b -B; Índice de clorofila total -C, Índice de clorofila a/b – D em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após o transplantio.....75

Figura 8. Massa seca radicular (MSR) – (A, B) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com diferentes adubações potássicas de rustificação e submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....76

Figura 9. Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro do coleto (DC)-B e Índice de robustez (H/DC) -C, em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após transplantio.....77

Figura 10. Massa seca da parte aérea (MSPA) - (A; B) e massa seca total (MST)- (C; D) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos.....80

## LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

<i>A</i>	Taxa fotossintética	( $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
AF	Área Foliar	( $\text{cm}^2$ )
Al	Alumínio	( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )
B	Boro	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
Ca	Cálcio	( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )
Cu	Cobre	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
CTC	Capacidade de troca catiônica	( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )
DAP	Diâmetro na altura do peito	(mm)
DC	Diâmetro do coleto	(mm)
DNS	Diâmetro ao nível do solo	(mm)
<i>E</i>	Taxa transpiratória	( $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )
EUA	Eficiência instantânea do uso da água	
ETR	Taxa de transporte de elétrons	
$F_0$	Fluorescência inicial	
Fv/Fm	Rendimento quântico potencial do fotossistema II	
Fe	Ferro	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
$Y_{II}$	Rendimento quântico efetivo do fotossistema II	
qP	Coefficiente de dissipação fotoquímica	
H	Altura da parte aérea	(cm)
H/DC	Índice de Robustez	
H+Al	Hidrogênio mais alumínio	( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )
IQD	Índice de qualidade de Dickson	
K	Potássio	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
K Folha	Teor de potássio foliar	( $\text{g Kg}^{-1}$ )
KCl	Cloreto de Potássio	
LVd	Latossolo Vermelho distrófico	
Mg	Magnésio	( $\text{cmolc dm}^{-3}$ )
MSPA	Massa seca da parte aérea	( $\text{g planta}^{-1}$ )
MSPA/MSR	Relação massa seca da parte aérea e massa seca da raiz	
MSR	Massa seca radicular	( $\text{g planta}^{-1}$ )
MST	Massa seca total	( $\text{g planta}^{-1}$ )
M.O	Matéria orgânica	( $\text{g dm}^{-3}$ )
N	Nitrogênio	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
N Folha	Teor de nitrogênio foliar	( $\text{g Kg}^{-1}$ )
P	Fósforo	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
P Folha	Teor de fósforo foliar	( $\text{g Kg}^{-1}$ )
S	Enxofre	( $\text{mg dm}^{-3}$ )
pH	Potencial hidrogeniônico	
TLE	Taxa de liberação de eletrólitos	%
<i>A/Ci</i>	Eficiência instantânea de carboxilação	
<i>A/g<sub>s</sub></i>	Eficiência intrínseca do uso da água	
AdEp	Epiderme adaxial	
AbEp	Epiderme abaxial	
PP	Parênquimas paliçádico	
SP	Parênquimas esponjoso	

$Y_{NPQ}$	Rendimento quântico de dissipação regulada	
SFT	Superfosfato triplo	
Vc	Volume cilíndrico com casca	(m <sup>3</sup> .ha <sup>-1</sup> )
V	Saturação de bases	(%)
Zn	Zinco	(mg dm <sup>-3</sup> )
$\Psi_{wam}$	Potencial hídrico foliar na antemanhã	MPa
$\Psi_w$ 12:00	Potencial hídrico foliar ao meio-dia	MPa

## RESUMO GERAL

SILVA, IGOR OLACIR FERNANDES. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, fevereiro de 2024. **Adubação nitrogenada e fosfatada e uso de potássio na indução de resistência a déficit hídrico em *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn.** Orientador: Dsc. Leandro Carlos.

Em contexto de mudanças climáticas, a restrição hídrica e a deficiência nutricional são fatores que afetam o crescimento e desenvolvimento das espécies vegetais, inclusive florestais como o cedro indiano. Sendo assim, o objetivo do presente estudo foi avaliar as características morfológicas, anatômicas, fisiológicas e produtivas de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* em resposta a adubação nitrogenada e fosfatada, utilizando dos fertilizantes ureia e superfosfato triplo no sulco de plantio, além disso avaliou-se a eficiência de uso da adubação potássica de rustificação para tolerar os efeitos do déficit hídrico. O primeiro e segundo capítulo consistiram de 2 experimentos distintos em delineamento em blocos ao acaso (DBC) em que foram testadas 5 doses de nitrogênio (0; 11; 22; 45 e 90 g de N por planta) e 5 doses de fósforo (0; 20; 40; 80 e 160 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta) aplicadas no sulco de plantio em Latossolo Vermelho distrófico. Para o último capítulo foi realizado um experimento em esquema fatorial 2x5, sendo testadas 2 adubações de rustificação potássica (parcial e completa) e 5 reposições hídricas no solo (30; 40; 50; 60 e 70% da capacidade de campo (CC)) em vasos em ambiente controlado. Os parâmetros mensurados durante os experimentos foram: altura da parte aérea, diâmetro do coleto, diâmetro ao nível do solo, diâmetro de copa, comprimento foliar, largura foliar, área foliar, diâmetro na altura do peito, volume cilíndrico de madeira com casca, acúmulo de biomassa, trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, potencial hídrico foliar, taxa de liberação de eletrólitos, índices de clorofila, índice de robustez, teor e acúmulo de N, P, K, Ca, Mg, S, micromorfometria e anatomia foliar. A adubação nitrogenada promoveu incremento no crescimento, índices de clorofila, taxa fotossintética, acúmulo de N nas folhas e proporcionou maior volume cilíndrico de madeira no primeiro ano com melhores resultados na dose de 22 g de N por planta no sulco de plantio. As doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio apresentaram resposta crescente aos parâmetros morfológicos, fisiológicos e de produção avaliados, com maior eficiência técnica na dose de 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (133 kg. ha<sup>-1</sup>) aplicadas no sulco por planta. O estresse hídrico das plantas submetidas a 30% da capacidade de campo apresentou reduções na taxa fotossintética, e conseqüentemente afetou negativamente as demais variáveis morfofisiológicas. Adubações potássicas de rustificação na produção

das mudas de cedro indiano permitiram melhor estabelecimento pós-plantio, proporcionando incremento na eficiência do uso da água, taxa fotossintética, índices de clorofila e produção de biomassa total tornando-se importante ferramenta de manejo para plantios comerciais.

**PALAVRAS-CHAVE:** cedro indiano; fertilizantes; nutrição; restrição hídrica; morfofisiológicas; anatomia foliar.

#### ABSTRACT

SILVA, IGOR OLACIR FERNANDES. Goiano Federal Institute – Campus Rio Verde – GO, february 2024. **Nitrogen and phosphate fertilization and use of potassium in inducing resistance to water deficit in *Acrocarpus fraxnifolius* Wight & Arn.** Adviser: Dsc. Leandro Carlos.

In a context of climate change, water restriction and nutritional deficiency are factors that affect the growth and development of plant species, including forest species such as Indian cedar. Therefore, the objective of the present study was to evaluate the morphological, anatomical, physiological and productive characteristics of *Acrocarpus fraxinifolius* seedlings in response to nitrogen and phosphate fertilization, using urea and triple superphosphate fertilizers in the planting furrow, in addition to evaluating the efficiency of rustification potassium fertilizer use to tolerate the effects of water deficit. The first and second chapters consisted of 2 different experiments in a randomized block design (DBC) where 5 nitrogen doses (0; 11; 22; 45 and 90 g of N per plant) and 5 phosphorus doses (0; 20; 40; 80 and 160 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per plant) were applied in the planting furrow in a dystrophic Red Oxisol. For the last chapter, an experiment was carried out in a 2x5 factorial scheme, testing 2 potassium rustification fertilizations (partial and complete) and 5 water replacements in the soil (30; 40; 50; 60 and 70% of field capacity (CC)) in pots in a controlled environment. The parameters measured during the experiments were: shoot height, stem diameter, diameter at ground level, crown diameter, leaf length, leaf width, leaf area, diameter at breast height, cylindrical volume of wood with bark, accumulation biomass, gas exchange, chlorophyll a fluorescence, leaf water potential, electrolyte release rate, chlorophyll indices, Dickson quality index, robustness index, content and accumulation of N, P, K, Ca, Mg and S, micromorphometry and leaf anatomy. Nitrogen fertilization increased growth parameters, chlorophyll indices, photosynthetic rate, N accumulation in leaves and provided a greater cylindrical volume of wood in the first year with better results at a

dose of 22 g of N per plant in the planting furrow. The phosphorus doses applied in the planting furrow showed an increasing response to the morphological, physiological and production parameters evaluated, with greater technical efficiency at a dose of 80 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (133 kg. ha<sup>-1</sup>) applied in the furrow per plant. The water stress of plants subjected to 30% of field capacity showed reductions in the photosynthetic rate, which consequently negatively affected the other morphophysiological variables. Potassium rustification fertilizers in the production of Indian cedar seedlings allowed better post-planting establishment, providing an increase in water use efficiency, photosynthetic rate, chlorophyll levels and total biomass production, becoming an important management tool for commercial plantations.

**KEYWORDS:** Indian cedar; fertilizers; nutrition; water restriction; morphophysiological; leaf anatomy.

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Estudos para novas espécies, como *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn., (Indiandar), têm aumentado, despertando o interesse de pesquisadores brasileiros pelo rápido crescimento e diversificação de uso na indústria madeireira para formação de sistemas agroflorestais, e em plantios puros (VENTURIN *et al.*, 2014; FIRMINO *et al.*, 2015).

O cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*) é encontrado naturalmente em florestas mistas perenes de Índia, Bangladesh, Indonésia, Nepal e Mianmar, entre as latitudes 23° e 27° Norte, distribuídas desde o nível do mar até 1.500 m de altitude (FIRMINO *et al.*, 2015). Sua distribuição ocorre em áreas com temperaturas entre 19 e 28°C e precipitação anual variando de 1.000 a 2.000 mm (MUNGUAMBE *et al.*, 2020), com melhor desempenho silvicultural em solos profundos, argilosos e bem drenados, com pH entre 5 e 7 (VENTURIN *et al.*, 2014; SILVA *et al.*, 2016).

É uma árvore de grande porte da família Fabaceae, que tem sido utilizada como árvore de sombra em plantações de café, e para produção de madeira e/ou enriquecimento florestal (MUNGUAMBE *et al.*, 2020). Produz madeira dura, mas de fácil manuseio, utilizado, por exemplo, na fabricação de móveis finos, aplicação em edificações para acabamento, fabricação de instrumentos musicais e caixas para embalagens (FIRMINO *et al.*, 2015).

Devido a essa importância para indústria a silvicultura da espécie deve ser desenvolvida, sendo que as exigências nutricionais devem ser ponderadas. De modo geral, o N é requerido em quantidades superiores aos outros elementos, porque as plantas dependerem de maiores quantidades desse nutriente (MALAVOLTA, 2006). Para as espécies arbóreas, a baixa disponibilidade de N interfere no crescimento e no acúmulo de matéria seca das plantas (DA SILVA MORETTI *et al.*, 2015; NICOLOSO *et al.*, 2007) considerando que faz parte da estrutura da molécula de clorofila, pigmento responsável pela absorção da luz solar (TAIZ *et al.*, 2017).

As espécies arbóreas absorvem o N preferencialmente na forma nítrica ( $\text{NO}_3^-$ ) e amoniacal ( $\text{NH}_4^+$ ), sendo que essas formas de N aproximam-se das raízes por fluxo de massa e são absorvidas por transportadores, presentes nas membranas das células na epiderme das raízes (MALAVOLTA, 2006; TAIZ *et al.*, 2021). Após a absorção o N é incorporado a compostos nitrogenados nas células, sendo parte acumulada e o restante transportado via xilema para a parte aérea (MARSCHNER, 2012).

Assim, como o nitrogênio, o fósforo (P) também é um dos nutrientes mais exigidos pelas plantas, especialmente, por atuar indiretamente na taxa de transporte de elétrons (ETR) participando da redução/fosforilação formando o NADPH/ATP, produtos necessários na fase redutiva do carbono responsável pela oxidação/desfosforilação liberando o  $\text{NADP}^+ / \text{ADP}$ . Assim, o P está diretamente vinculado às etapas fotoquímica e bioquímica da fotossíntese (COSTA *et al.*, 2020), e associado diretamente com o metabolismo do carbono (TAIZ *et al.*, 2017).

Os solos brasileiros na maioria apresentam baixa disponibilidade de P, sendo necessária a realização de adubação com fertilizantes fosfatados para garantir o suprimento desse nutriente no solo e, conseqüente disponibilidade para as plantas (BARBOSA, 2020). A adubação fosfatada é realizada na implantação do povoamento, não sendo complementada durante o ciclo vegetativo, pois o P adicionado é suficiente para elevar o teor disponível no solo até o nível crítico, mantendo-se ao longo do crescimento pela baixa quantidade de nutriente exportado por espécies arbóreas (CQFS-RS/SC, 2016), e a baixa mobilidade do nutriente no solo. Desse modo, os teores de P natural do solo e os aportados via adubação devem ser suficientes para atender a demanda das plantas em todo o seu ciclo (DIAS *et al.*, 2015).

Espécies florestais apresentam respostas positivas à adição de doses de fósforo, efeito observado em espécies mogno-africano *Khaya ivorenses* A Chev (ARAÚJO, 2020); *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* (STAHL *et al.* 2013); *Acacia mangium* Willd (ARAÚJO *et al.* 2020).

O potássio (K) tem como uma das principais funções a regulação da abertura e fechamento estomático, atua nos processos de trocas gasosas, conduzindo a respiração e fotossíntese por meio do ajustamento osmótico (HASANUZZAMAN *et al.* 2018), além de estar diretamente integrado com o metabolismo do nitrogênio e do carbono (ZAHOOR *et al.*, 2017).

O potássio (K) pode ser utilizado na fase de "rustificação", que dura de 15 a 30 dias, reduzindo as regas e suspendendo as adubações de cobertura, principalmente a nitrogenada favorecendo o engrossamento do caule (BENEDETTI, 2015), com o objetivo de acelerar o crescimento inicial das mudas no campo, recomenda-se a adubação de expedição antes de sair do viveiro (HIGASHI; DE ARRUDA SILVEIRA 2004), porém poucos estudos avaliam o efeito das adubações de rustificação após o transplantio.

Com o cenário atual de mudanças climáticas os ecossistemas tendem a série de desbalanços ambientais, com efeito direto no aumento da temperatura e alteração nas precipitações (COSTA *et al.*, 2015). Dessa forma, o interesse em estudar a adaptação de espécies no cerrado as novas condições climáticas do aquecimento global via adubação nitrogenada, fosfatada e os efeitos de adubações de rustificação combinadas à restrição hídrica.

A nutrição aumenta a tolerância das espécies à restrição hídrica, que afeta o crescimento, metabolismo e a eficiência fotossintética, caso encontre presente em concentrações adequadas (BATTIE-LACLAU *et al.*, 2014; TARIQ *et al.*, 2017 e 2018; HUANG *et al.*, 2018).

Sabe-se que em condições de estresse hídrico há alterações nas trocas gasosas aliadas a alterações estruturais nos cloroplastos, afetando diretamente a eficiência fotoquímica do fotossistema II (PSII), variando em intensidade de acordo com a espécie. Como consequência há comprometimento do potencial produtivo, seja por limitações difusivas, decorrentes da redução da condutância estomática ( $g_s$ ), podendo levar a alterações na atividade de algumas enzimas importantes, como a Ribulose bifosfato carboxilase (Rubisco) (GALLÉ *et al.*, 2011).

Diante disso, testaram as hipóteses de que as mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* cultivadas em solos com a aplicação de N permitirão maior absorção de luz utilizada na fotossíntese para a produção de biomassa, a adição de P no solo permite maior absorção do nutriente aumentando o crescimento em altura e diâmetro e o uso da adubação potássica na fase de rustificação na produção de mudas aumenta a tolerância ao estresse hídrico.

## **2. OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GERAL**

Avaliar as respostas da adubação nitrogenada e fosfatada aplicada no sulco de plantio e o uso da adubação potássica na fase de rustificação no viveiro na tolerância após o transplante em *Acrocarpus fraxinifolius*.

## OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Avaliar o crescimento e parâmetros fisiológicos em plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a adubação nitrogenada no sulco de plantio;
2. Verificar a influência das doses de fósforo, no crescimento e parâmetros fisiológicos de plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*;
3. Avaliar o potencial de uso da adubação potássica de rustificação na tolerância ao déficit hídrico em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius*.
4. Verificar a influência das reposições hídricas sobre atributos fisiológicos e morfológicos de plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*;

## 3. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BARBOSA, KÁSSIA DE PAULA. **Fontes e formas de aplicação de fertilizantes fosfatados em cultivos consecutivos de soja em Latossolo de alta fertilidade no cerrado**. Tese (Doutorado em Ciências Agrárias- Agronomia) - Instituto federal Goiano, Campus Rio Verde, 133p., 2020.

BATTIE-LACLAU, P., LACLAU, J.P., DOMEQ, J.C., CHRISTINA, M., BOUILLET, J.P., PICCOLO, M.C., GONÇALVES, J.L.M., MOREIRA, R.M., KRUSCHE, A.V., BOUVET, J.M., NOUVELLON, Y. (2014). Effects of potassium and sodium supply on drought-adaptive mechanisms in *Eucalyptus grandis* plantations. **New Phytologist**, 203(2), 401–413. <https://doi.org/10.1111/nph.12810>

BENEDETTI, Vanderlei. **Nutrição e fertilização florestal [prefácio]**. Piracicaba: IPEF., 2015.

COSTA, A.C., REZENDE-SILVA, S.L., MEGGUER, C.A., MOURA, L.M.F., ROSA, M., SILVA, A.A., 2015. The effect of irradiance and water restriction on photosynthesis in young jatobá-do-cerrado (*Hymenaea stigonocarpa*) plants. **Photosynthetica** 53, 118 – 127. <http://doi.org/10.1007/s11099-015-0085-6>

COSTA, Andréia Mendes da. **DOSES DE URÉIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E CLORETO DE POTÁSSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E NO ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA**. 2020.

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

DA SILVA ARAÚJO, Matheus et al. Crescimento e eficiência nutricional de mudas de acácia em resposta à adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 15, n. 2, p. 7503, 2020.

DA SILVA MORETTI, B. et al. Growth and mineral nutrition in seedlings of australian cedar (*Toona ciliata*) subjected to nutrient deprivation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 453–464, 2015.

DIAS, L.P.R.; Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Simonete, M.A.; Bicaratto, B. Eficiência relativa de fosfatos naturais na adubação de plantio de Mudas de *Eucalyptus dunnii* maiden e *Eucalyptus benthamii* maiden et cambage em solo sem e com calagem. **Ciência Florestal**, v.25, n.1, p. 37-48, 2015. <https://doi.org/10.1590/1980>.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathol**, Botucatu, v. 41, n. 2, p. 160, 2015.

GALLÉ, A., FLOREZ-SARASA, I., AOUOUAD, H. E., FLEXAS, J., 2011. The Mediterranean evergreen *Quercus ilex* and the semi deciduous *Cistus albidus* differ in their leaf gas exchange regulation and acclimation to repeated drought and re-watering cycles. **Journal of Experimental Botany** 62, 1–10. <https://doi.org/10.1093/jxb/err233>

HASANUZZAMAN, M., BHUYAN, M.H.M.B., NAHAR, K., HOSSAIN, M.S., MAHMUD, J.A., HOSSEN, M.S., MASUD, A.A.C., MOUMITA, FUJITA, M., 2018. Potassium: a vital regulator of plant responses and tolerance to abiotic stresses. **Agronomy** 8, 1 – 29. <http://doi.org/10.3390/agronomy8030031>

HIGASHI, Edson Namita; DE ARRUDA SILVEIRA, Ronaldo Luiz Vaz. 5.1- **FERTIRRIGAÇÃO EM VIVEIROS DE MUDAS DE *Eucalyptus* e *Pinus***. 2004.

Huang, L., Li, M., Shao, Y., Sun, T., Li, C., Ma, F., 2018a. Ammonium uptake increases in response to PEG-induced drought stress in *Malus hupehensis*. **Environmental and Experimental Botany** 151, 32-42. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2018.04.007>

Huang, L., Li, M., Zhou, K., Sun, T., Hu, L., Li, C., Ma, F., 2018b. Uptake and metabolism of ammonium and nitrate in response to drought stress in *Malus prunifolia*. **Plant Physiology and Biochemistry** 127, 185–193. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.03.031>

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, P. A - Marschner ' s Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**, v. 3 rd Ed, p. 651, 2012.

MUNGUAMBE, João Faustino et al. Quality of Indian cedar seedlings grown under micronutrient omission. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 63, 2020.

NICOLOSO, F. T. et al. Nutritional demand of grápia in Paleaudalf soil: effect of NPK fertilization on content of nutrients in the tissues. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 2, p. 372–380, 2007.

SILVA, D. S. N.; VENTURIN, N.; RODAS, C. L.; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P.; MELO, L.A. Growth and mineral nutrition of baru (*Dipteryx alata* Vogel) in nutrient solution. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 20, n. 12, p. 1101-1106, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v20n12p1101-1106>

STAHL, J. et al. Produção de massa seca e eficiência nutricional de clones de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* em função da adição de doses de fósforo ao solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 287–295, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAIZ, Lincoln et al. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal-6**. Artmed Editora, 2021.

TARIQ, A., PAN, K., OLATUNJI, O.A., GRACIANO, C., LI, Z., SUN, F., SUN, X., SONG, D., CHEN, W., ZHANG, A., WU, X., ZHANG, L., MINGRUI, D., XIONG, Q., LIU, C., 2017. Phosphorous application improves drought tolerance of *Phoebe zhennan*. **Frontiers in Plant Science** 8, 1 – 12. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.01561>

TARIQ, A., PAN, K., OLATUNJI, O. A., GRACIANO, C., LI, Z., SUN, F., ZHANG, L., WU, X., CHEN, W., SONG, D., HUANG, D., XUE, T., ZHANG, A., 2018. Phosphorous fertilization alleviates drought effects on *Alnus cremastogyne* by regulating its antioxidant and osmotic potential. **Scientific Reports** 8, 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-018-24038-2>

VENTURIN, N.; CARLOS, L. SOUZA, P. A. de; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P. HIGASHIKAWA, E. M. **Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades**. *Cerne* Lavras, vol.20 n. 4, oct- dec. 2014.

ZAHOOR, R., ZHAO, W., ABID, M., DONG, H., ZHOU, Z., 2017. Potassium application regulates nitrogen metabolism and osmotic adjustment in cotton (*Gossypium hirsutum* L.) functional leaf under drought stress. **Journal of Plant Physiology** 215, 30 – 38. <https://doi.org/10.1016/j.jplph.2017.05.001>

CAPÍTULO I  
ADUBAÇÃO FOSFATADA EM *Acrocarpus fraxnifolius* MART. APLICADA NO  
SULCO DE PLANTIO

## RESUMO

Árvores de alto valor comercial madeireiro como o *Acrocarpus fraxinifolius* podem apresentar baixo rendimento quando cultivadas com adubação fosfatada inadequada. Isso é frequente porque a maioria dos solos subtropicais e tropicais possuem baixa disponibilidade de fósforo (P) e baixa fertilidade natural diminuindo absorção do nutriente. No entanto, a adubação fosfatada pode incrementar a absorção do nutriente e consequentemente, o desenvolvimento das plantas para maior produção. Assim, objetivou-se verificar a influência das doses de P no crescimento, fisiologia e produção madeira de plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*. O plantio foi realizado em delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições de 10 plantas em cada unidade experimental. Os tratamentos testados foram cinco doses de P (0; 20; 40; 80 e 160 g de P por planta) aplicadas no sulco de plantio. As avaliações morfológicas de altura da parte aérea e diâmetro ao nível do solo foram avaliadas aos 90; 120 e 180 e 365 dias após o transplântio das mudas, enquanto a área foliar, diâmetro de copa, índices de clorofila, parâmetros fisiológicas, anatômicos e teores de macronutrientes foliar foram avaliados aos 180 dias após o transplântio. Os parâmetros de diâmetro a altura do peito e volume cilíndrico de madeira com casca foram mensurados aos 365 dias após o transplântio. Os efeitos da adubação fosfatada no crescimento das plantas apresentam maior expressividade a partir do 12º mês de cultivo. O uso de 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta no sulco de plantio (133 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) no plantio proporcionaram maior taxa fotossintética, eficiência do uso da água e consequentemente aumentou o crescimento e volume de madeira das plantas. A adição das doses P aumentou os teores de P nas folhas, promovendo maior altura e diâmetro. As plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* tiveram “acúmulo de luxo” na dose máxima de P, resultando em níveis mais elevados de nutrientes que geralmente não resultam em aumentos na produção. O maior crescimento é resultado dos efeitos positivos que o P proporcionou na concentração de índices de clorofila e consequentemente no aproveitamento da energia luminosa.

**Palavras-chave:** absorção; eficiência, fertilidade; acúmulo de luxo; madeira

## ABSTRACT

Trees with high commercial timber value such as *Acrocarpus fraxinifolius* may show low growth when cultivated with inadequate phosphate fertilizer. This is common because most subtropical and tropical soils have low phosphorus (P) availability and low natural fertility, reducing nutrient absorption. However, phosphate fertilizer can increase nutrient absorption and, consequently, plant development for higher production. Thus, the objective was to verify the influence of P doses on the growth, physiology and wood production of *Acrocarpus fraxinifolius* plants. Planting was carried out in a randomized block design, with four replications of 10 plants in each experimental unit. The treatments tested were five P doses (0; 20; 40; 80 and 160 g of P per plant) applied in the planting furrow. Morphological assessments of aerial part height and diameter at ground level were evaluated at 90; 120 and 180 and 365 days after transplanting the seedlings, while leaf area, crown diameter, chlorophyll indices, physiological and anatomical parameters and leaf macronutrient content were evaluated at 180 days after transplanting. The parameters of diameter at breast height and cylindrical volume of wood with bark were measured 365 days after transplanting. The effects of phosphate fertilizer on plant growth become more significant from the 12th month of cultivation. The use of 80 g of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> per plant in the planting furrow (133 kg of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> ha<sup>-1</sup>) at planting provided a higher photosynthetic rate, water use efficiency and consequently increased plant growth and wood volume. The P doses addition increased the P content in the leaves, promoting greater height and diameter. *Acrocarpus fraxinifolius* plants had a “luxury intake” of maximum P dose, resulting in higher nutrient levels that generally do not result in increases in yield. The highest growth is the result of the positive effects that P provided on the chlorophyll levels concentration and consequently on the light energy use.

**Keywords:** absorption; efficiency, fertility; luxury intake; wood

## 1. INTRODUÇÃO

O *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. pertencente à família Fabaceae, subfamília Caesalpinioideae, popularmente conhecido como cedro indiano, guijarra, lazcar ou mundane (MARTÍNEZ *et al.*, 2006; FIRMINO *et al.*, 2015), a árvore adulta é reta e atinge, em média, 15 a 20 m de altura e 30 a 50 cm de diâmetro (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A espécie tem despertado interesse por ser uma espécie florestal de crescimento rápido e bem adaptada as condições brasileiras (Venturin *et al.*, 2014) além de apresentar grande potencial madeireiro, por suas características tecnológicas, massa específica básica de 0,458 g/cm<sup>3</sup>, baixa estabilidade dimensional e boa resistência mecânica (TRIANOSKI *et al.*, 2011; BARROS OLIVEIRA *et al.*, 2022; SANTOS, 2023).

A silvicultura tem papel primordial, na busca por alternativas para produzir mudas de grande qualidade, altas taxas de sobrevivência e produtividade (THEBALDI *et al.*, 2015). A introdução de espécies exóticas com potencial florestal já conhecidas em outros países, é ótima alternativa para atender as demandas de mercado (VENTURIN *et al.*, 2014; BARBOSA *et al.*, 2021).

Os solos brasileiros na maioria apresentam baixa disponibilidade de P, sendo necessária a realização de adubação com fertilizantes fosfatados para garantir o suprimento do nutriente no solo e, conseqüente disponibilidade para as plantas (BARBOSA, 2020). A adubação fosfatada é realizada na implantação do povoamento, não sendo complementada durante o ciclo vegetativo, o P adicionado é suficiente para elevar o teor disponível no solo até o nível crítico (CQFS-RS/SC, 2016). Desse modo, os teores de P natural do solo e os aportados via adubação devem ser suficientes para atender a demanda das plantas em todo o seu ciclo (DIAS *et al.*, 2015; PROCHNOW, CASARIN & SITPP, 2014; BELLOTE, 2020).

Dentre os nutrientes essenciais para o desenvolvendo das plantas o fósforo (P) tem grande importância, a deficiência pode causar impacto negativo em processos fisiológicos e morfológicos, podendo inibir o crescimento das células, e desencadear redução na produção de matéria seca, entre outros processos essenciais para o ciclo de vida normal da planta (GRANT *et al.* 2001; CASTRO 2007; NAVARRO 2013; LINCOLN; ZEIGER; MØLLER, 2021).

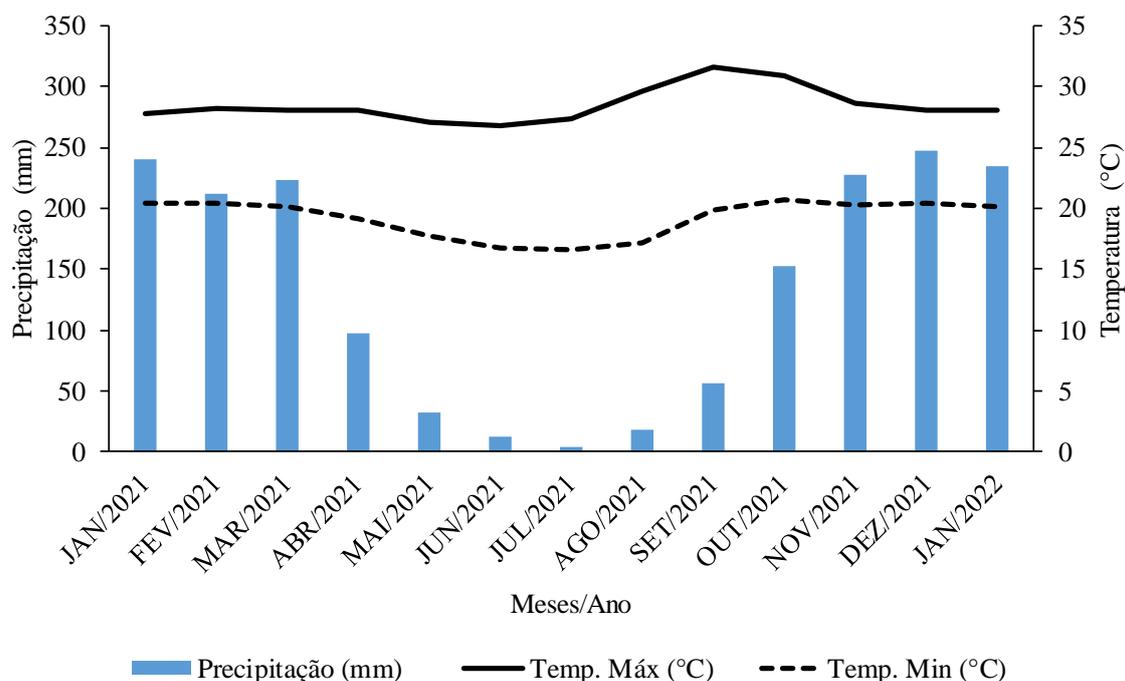
O P é um dos nutrientes mais exigidos pelas plantas, especialmente, por atuar na taxa de transporte de elétrons (ETR) participando da redução/fosforilação formando o NADPH/ATP, produtos necessários na fase reductiva do carbono responsável pela oxidação/desfosforilação liberando o  $\text{NADP}^+ / \text{ADP}$  (BERGHETTI, 2020). Assim, o P está diretamente vinculado às etapas fotoquímica e bioquímica da fotossíntese (COSTA *et al.*, 2020), e associado diretamente com o metabolismo do carbono (TAIZ *et al.*, 2017).

Espécies florestais apresentam respostas positivas à adição de doses de fósforo, conforme observado em espécies como o mogno-africano (*Khaya ivorenses* A Chev) (ARAÚJO, 2020), *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* (STAHL *et al.* 2013) e *Acacia mangium* Willd (ARAÚJO *et al.* 2020).

Devido à importância desse nutriente para o crescimento das plantas, faz-se necessário a realização de estudos específicos no crescimento e fisiologia de mudas de espécies florestais como cedro indiano a fim de avaliar a exigência da espécie ao nutriente. Diante disso, objetivou-se com este trabalho avaliar parâmetros morfológicos, fisiológicos e anatômicos em mudas de *Acrocarpus fraxnifolius* em resposta à adubação fosfatada em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) de textura média na região Centro-Oeste.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no viveiro do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais, nos períodos de setembro de 2020 a janeiro de 2022, e na área experimental do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde- GO, Brasil (17°47' S e 50 54' W). O clima da região de estudo é do tipo Aw (Köppen), com uma estação chuvosa, dezembro a fevereiro, com precipitação superior a 250 mm por mês, uma estação seca, de maio a setembro, com verões brandos e invernos secos. As médias anuais de precipitação temperatura são respectivamente 1529,5 mm e 22,4°C, (ALVAREZ *et al.*, 2014). A temperatura média anual do ar e a precipitação total no período de estudo foram de 23,4°C e 1759 mm, respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Valores de precipitação acumulada (mm) e médias de temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) do ar durante o período de condução do plantio de plantas *Acrocarpus fraxinifolius* no campo.

Fonte: BDMET-INMET (2022)

As sementes de *Acrocarpus fraxinifolius* utilizadas neste estudo foram coletadas no pomar de sementes localizado na Universidade Federal de Lavras, logo após a coleta foram beneficiadas seguindo recomendações de Davide e Silva (2008). A quebra da dormência foi realizada em ácido sulfúrico concentrado por 10 minutos (Rai, 1976). O substrato utilizado nos experimentos foi o Bioplant (substrato comercial) e na área experimental o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) seguindo sistema brasileiro de classificação dos solos (SANTOS, 2013).

A produção das mudas teve início no mês de setembro de 2020 no viveiro do laboratório de cultura de tecidos no Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde, foram semeadas três sementes em tubetes de 55 cm<sup>3</sup> contendo substrato comercial Bioplant com casca de arroz carbonizada na proporção de 2:1 e aos 10 dias após à semeadura foi feito o desbaste deixando uma única muda. As adubações de base nas mudas produzidas foram feitas de acordo com a fertilização usada no viveiro florestal da ESALQ proposta por Benedetti, (2015). As mudas foram mantidas em viveiro até 120 dias, tendo em média 20 cm de altura e 3,5 mm de diâmetro do coleto (DC).

Foram realizadas análises químicas e físicas do solo (tabela 1) 70 dias antes da implantação do experimento, para caracterização do solo, segundo Santos *et al.*, (2013). As amostras foram coletadas de dez pontos diferentes da camada de 0-20 e 20-40 cm e realizada análise da composição química (EMBRAPA, 2010).

**Tabela 1.** Característica química e granulométrica da amostra de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) da área de experimental, na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm.

Profundidade cm cm	pH	K	P	Cu	Mg	Al	H-Al	
								(H <sub>2</sub> O)
0-20	5.40	254.65	3.07	3.36	1.19	0.10	5.20	
20-40	5.50	160.85	1.92	2.94	1.03	0.10	3.60	
	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem	
		cmolc/dm <sup>3</sup>		%			mg/L	
0-20	5.2	5.3	10.4	50.03	1.89	2.07	14	
20-40	4.38	4.48	7.98	54.92	2.23	1.69	12.7	
	Zn	Fe	Cu	B	S	Argila	Silte	Areia
	mg/dm <sup>3</sup>				%			
0-20	5.6	14.6	1.98	0.05	7.3	32	14	54
20-40c	3.4	15.8	1.83	0.04	8.6	*	*	*

pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5 P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrador Mehlich 1 Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L H + Al- Extrator: SMP SB= Soma de Bases Trocáveis CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 V= Índice de Saturação de Bases m= Índice de Saturação de Alumínio Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10N P-rem: Fósforo Remanescente B- Extrator água quente S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético Solo Tipo 2: Textura Média.

As mudas foram transplantadas na área experimental, utilizando delineamento em blocos ao acaso (DBC), com 5 doses, 4 blocos e 10 plantas por parcela, sendo as doses de fósforo (0; 20; 40; 80 e 160 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta aplicadas no sulco de plantio) aplicadas na adubação de plantio.

A fonte utilizada no experimento para as doses de fósforo foi o superfosfato triplo (ST). A adubação básica com macro e micronutrientes foi balanceada visando todas as plantas receberem a mesma adubação, com exceção dos tratamentos segundo recomendação Embrapa, (2010) aplicando-se 45 g de nitrogênio por planta utilizando como fonte a ureia.

Em relação à adubação de cobertura foi aplicada aos 90 dias após transplântio (DAT), ureia na dose de 45 g de N por planta na superfície do solo, sem incorporação e na projeção da copa das plantas (CQFS-RS/SC, 2016), sendo a aplicação realizada com o solo úmido. Ainda não há recomendações para o *Acrocarpus fraxinifolius*, as adubações seguiram recomendação para cultura de espécies do gênero *Eucalyptus* (Embrapa., 2010).

As mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foram transplantadas manualmente, utilizando espaçamento 2x3 m. As parcelas constituídas de uma área total de 30 m<sup>2</sup> (3 x 10 m), totalizando 10 plantas. O controle de formigas foi realizado periodicamente com o uso de iscas granuladas, distribuídas dentro e nas proximidades da área experimental. Para o controle de plantas invasoras será feita aplicações de Roundap® na dose de 2,0 L ha<sup>-1</sup> do produto comercial, e capinas manuais quando necessário. O coroamento das mudas na área experimental também foi feito periodicamente quando necessário.

O parâmetros morfológicos de altura da parte aérea (H), diâmetro ao nível do solo (DNS) foram realizados aos 90; 120; 180 e 365 dias após o transplântio. A H foi medida com trena métrica e o DNS com o auxílio de um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm) até aos 365 dias após o transplântio. O diâmetro de copa foi estimado a partir de duas medições cruzadas da copa, com trena métrica aos 180 dias após o transplântio.

Para a área foliar, foram medidos o comprimento e largura de três folhas, selecionadas aleatoriamente, na qual a primeira folha sendo da parte superior, a segunda da parte mediana, e a terceira da parte inferior da copa, de acordo com Lima (2013), aferindo o comprimento e largura médias para obtenção do produto do CF (comprimento foliar) pela LF (largura foliar) em cm<sup>2</sup> que foram em seguida multiplicados pelo NF para obtenção da área foliar total. As mensurações da área foliar total das plantas foram realizadas aos 180 dias após o transplântio.

O diâmetro na altura do peito (DAP) foi mensurado aos 365 dias após o transplântio com o auxílio de fita dendrométrica e paquímetro. O volume cilíndrico com casca (m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>) das árvores foi determinado aos 365 dias após o plantio utilizando a equação genérica para cálculo de volume cilíndrico, sendo  $V_c = H * [(\pi * DAP^2) / 4]$ .

Os índices de clorofila foram avaliados aos 180 dias após o transplântio com medidor portátil, ClorofiLOG1030® (Falker®, Porto Alegre, Brasil), medindo a quantidade de clorofila a; b e totais em folhas do terço médio da planta. As medições das variáveis morfológicas e índices de clorofila foram realizadas em todas as plantas e calculadas as médias para cada tratamento.

As trocas gasosas das plantas foram mensuradas aos 180 dias após transplântio para estimar as variáveis de taxa fotossintética ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa transpiratória ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) e a relação entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> ( $C_i/C_a$ ), em folhas completamente expandidas no terço médio da planta. A partir desses dados foi possível calcular a eficiência instantânea do uso da água (EUA

=  $A/E$ ), a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) e a eficiência instantânea de carboxilação; ( $A/C_i$ ) (Machado *et al.*, 2005). As medições foram realizadas utilizando analisador de gases ao infravermelho (LI-6400XTR, Licor®, Lincoln, Nebraska, EUA), utilizando radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante (1000  $\mu\text{mol f\u00f3tons m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração atmosf\u00e9rica de  $\text{CO}_2$  ( $C_a$ ) ( $\sim 430 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), temperatura ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ) e umidade ( $\sim 65\%$ ) ambientes.

Para o teor de macronutrientes foram coletadas aos 180 dias ap\u00f3s o transpl\u00e2ntio folhas do ter\u00e7o m\u00e9dio de cada planta da parcela obtendo amostras compostas que foram em seguida colocadas em estufa a  $65^\circ\text{C}$  por 72 horas at\u00e9 massa constante. Ap\u00f3s a secagem, as amostras foliares foram pesadas em balan\u00e7a de precis\u00e3o (0,01 g), mo\u00eddas e quantificadas as concentra\u00e7\u00f5es de P e K foliar por meio de extra\u00e7\u00e3o com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, usando 0,2 g de material triturado em moinho tipo Willey, com peneira de malha de 0,5 mm.

A determina\u00e7\u00e3o do P foi realizada por espectrofotometria com azul de molibd\u00eanio e o K por fotometria de chamas, conforme metodologias para an\u00e1lise qu\u00edmica de tecido vegetal descrita em Da Silva *et al.* (2009).

Para as an\u00e1lises morfoanat\u00f4micas foram coletadas amostras foliares de  $3 \text{ cm}^2$  da regi\u00e3o central da \u00faltima folha totalmente expandida de todas as repeti\u00e7\u00f5es ( $n=4$ ) de cada tratamento ( $n=5$ ) das plantas de cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*) aos 180 dias ap\u00f3s o transpl\u00e2ntio. Inicialmente as amostras foram fixadas em FAA<sub>70</sub> por 24 horas. Ap\u00f3s este per\u00edodo, o material vegetal foi pr\u00e9-lavado em tamp\u00e3o fosfato (0,1 M, pH 7,2) e desidratado em s\u00e9rie et\u00edlica crescente (30% a 100%), pr\u00e9-infiltrado e infiltrado em historesina (Leica, Alemanha), conforme as recomenda\u00e7\u00f5es do fabricante.

Posteriormente, as amostras foram seccionadas transversalmente a  $5 \mu\text{m}$  de espessura em micr\u00f3tomo rotativo (Modelo 1508R, Logen Scientific, China) e os cortes corados com azul de toluidina - colora\u00e7\u00e3o policrom\u00e1tica (0,05% tamp\u00e3o fosfato 0,1 M, pH 6,8) (O'Brien *et al.*, 1964). As imagens foram obtidas atrav\u00e9s do microsc\u00f3pio Olympus (BX61, Tokyo, Jap\u00e3o) acoplado com c\u00e2mera DP-72 utilizando op\u00e7\u00e3o de campo claro. Posteriormente, foram realizadas observa\u00e7\u00f5es morfoanat\u00f4micas da epiderme de ambas as faces e par\u00eanquima clorofiliano.

As medidas de micromorfometria foram obtidas a partir das imagens capturadas usando o software ImageJ (Processamento e An\u00e1lise de Imagem em Java, v. 1.47, EUA). Foram realizadas medi\u00e7\u00f5es em dez observa\u00e7\u00f5es por repeti\u00e7\u00e3o para cada estrutura avaliada.

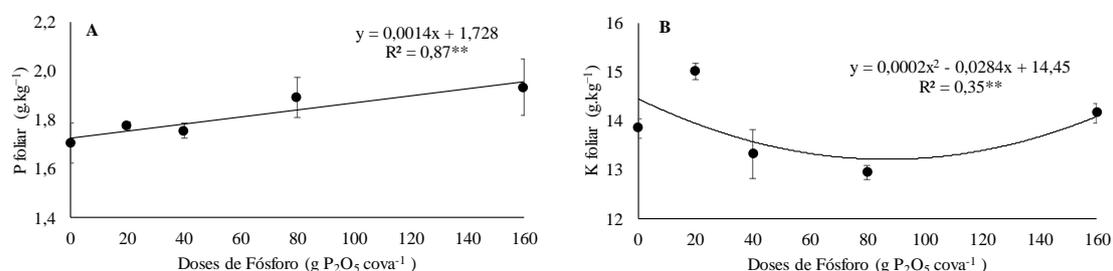
Os dados foram submetidos à análise de variância e quando detectados efeitos significativos dos tratamentos, foram ajustadas equações de regressão. Os dados foram processados pelo programa SAS® (Statistical Analysis System).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O teor de fósforo foliar (P foliar) e o teor de potássio foliar (K foliar) em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após transplântio apresentaram resposta a adubação fosfatada (Figura 2 A e B).

A dose de 160 g de  $P_2O_5$  por planta proporcionou maior valor para o P foliar ( $1,95 \text{ g.kg}^{-1}$ ), sendo 11,48; 10,04; 8,61 e 5,74% superior as doses 0, 20, 40 e 80 g de  $P_2O_5$ , respectivamente (Figura 2 A). O aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicados no sulco de plantio por planta proporcionou o aumento de 1,43% ( $0,03 \text{ g.kg}^{-1}$ ) no P foliar.

O K foliar apresentou resposta quadrática a adubação fosfatada, com valor de mínimo na dose de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo observado o teor foliar de  $13,46 \text{ g.kg}^{-1}$  (Figura 2 B). A dose de 160 g de  $P_2O_5$  proporcionou maior K foliar para as plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*, sendo 3,83; 7,08; 9,26 e 10,44% superior em relação as doses 0, 20, 40 e 80 g de  $P_2O_5$ , respectivamente.



**Figura 2.** Teor de fósforo foliar (P foliar) –A; Teor de potássio foliar (K foliar) - B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

A influência da adubação fosfatada na concentração de K foliar não é padrão nos estudos que relacionam estes dois nutrientes, pois há relatos que mostram diminuição (ROS *et al.*, 2019), aumento e não alteração (CORCIOLI *et al.*, 2016), não sendo possível estabelecer um padrão definido sobre o efeito da adubação fosfatada no estado nutricional de K nas plantas (ZAMBROSI, 2011).

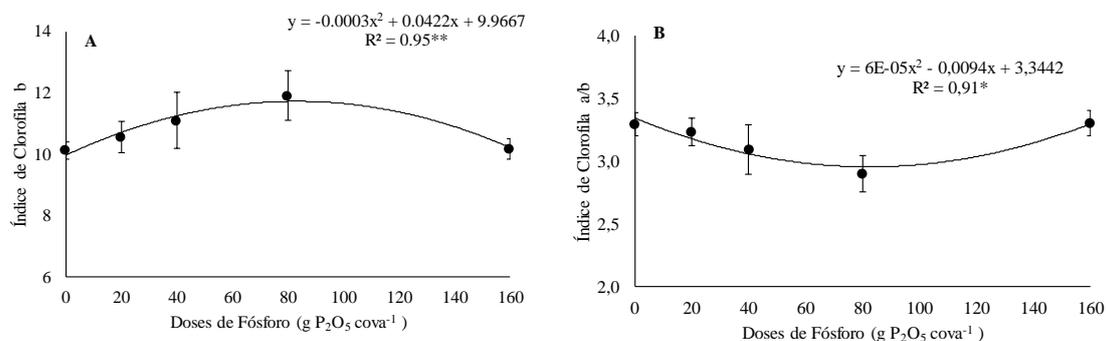
Para as plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* foram encontradas em todas as doses testadas concentrações de P foliar menores que  $2,0 \text{ g.kg}^{-1}$ , indicando menor absorção da espécie em comparação as plantas de mogno africano (Ros *et al* 2019).

O aumento da concentração de P nas folhas de cedro indiano provavelmente está relacionado a maior disponibilidade no solo com a adubação fosfatada. Resultados semelhantes foram observados por Ros *et al.* (2019) em plantas de mogno africano, no entanto Vasconcelos *et al.* (2017) não observaram efeitos na concentração de P foliar.

A equação com melhor ajuste para o índice de clorofila b e razão a/b foi a quadrática, sendo as doses de 80 e 0 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  aplicada no sulco por planta, as doses que proporcionaram maiores valores respectivamente (Figura 3 A e B).

O maior Índice de Clorofila b em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi encontrada na dose de 80 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sendo 14,94; 8,60; 4,00 e 12,81% superior em relação ao observado nas doses de fósforo de 0, 20, 40, e 160 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por planta, respectivamente.

Para o Índice de clorofila a/b maiores valores foram observados na dose de 0 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$ , sendo 4,94; 8,52; 11,58 e 1,34% superior em relação ao observado nas doses de fósforo de 20, 40, 80 e 160 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por planta, respectivamente. O menor valor encontrado para Índice de clorofila a/b (2,96) foi observado na dose de 82, 47 g de  $\text{P}_2\text{O}_5$  por planta.



**Figura 3.** Índice de Clorofila b – A; Índice de Clorofila a/b -B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

A adubação fosfatada influenciou positivamente as variáveis fisiológicas, taxa fotossintética (A), condutância estomática ( $g_s$ ), taxa transpiratória (E), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ), relação entre a concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ),

eficiência instantânea do uso da água (EUA), eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ ) e Eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ).

Para a  $A$  em função das doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio para o cedro indiano o modelo de equação de melhor ajuste foi o quadrático (Figura 4 A). A maior  $A$  em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi encontrada na dose de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo este 17,35; 10,60; 5,45 e 8,44% superior em relação ao observado nas doses de fósforo de 0, 20, 40, e 160 g de  $P_2O_5$  por planta, respectivamente. De acordo com equação de regressão a dose que proporcionou maior  $A$  para o cedro indiano foi a de 94 g de  $P_2O_5$  por planta, sendo observada  $A$  de  $14,95 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

A  $g_s$  das plantas de cedro indiano diferiu estatisticamente para as doses de fósforo, adequando ao modelo de regressão linear (Figura 4 B). Maiores valores de  $g_s$  aos 180 dias após transplantio foram observados na dose de fósforo de 160 g de  $P_2O_5$ , sendo 42,00; 36,75; 31,50 e 21,00% superior as doses de 0, 20, 40 e 80 g de  $P_2O_5$ , respectivamente. O aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicados no sulco de plantio por planta proporcionou o aumento de 5,25% na  $g_s$ .

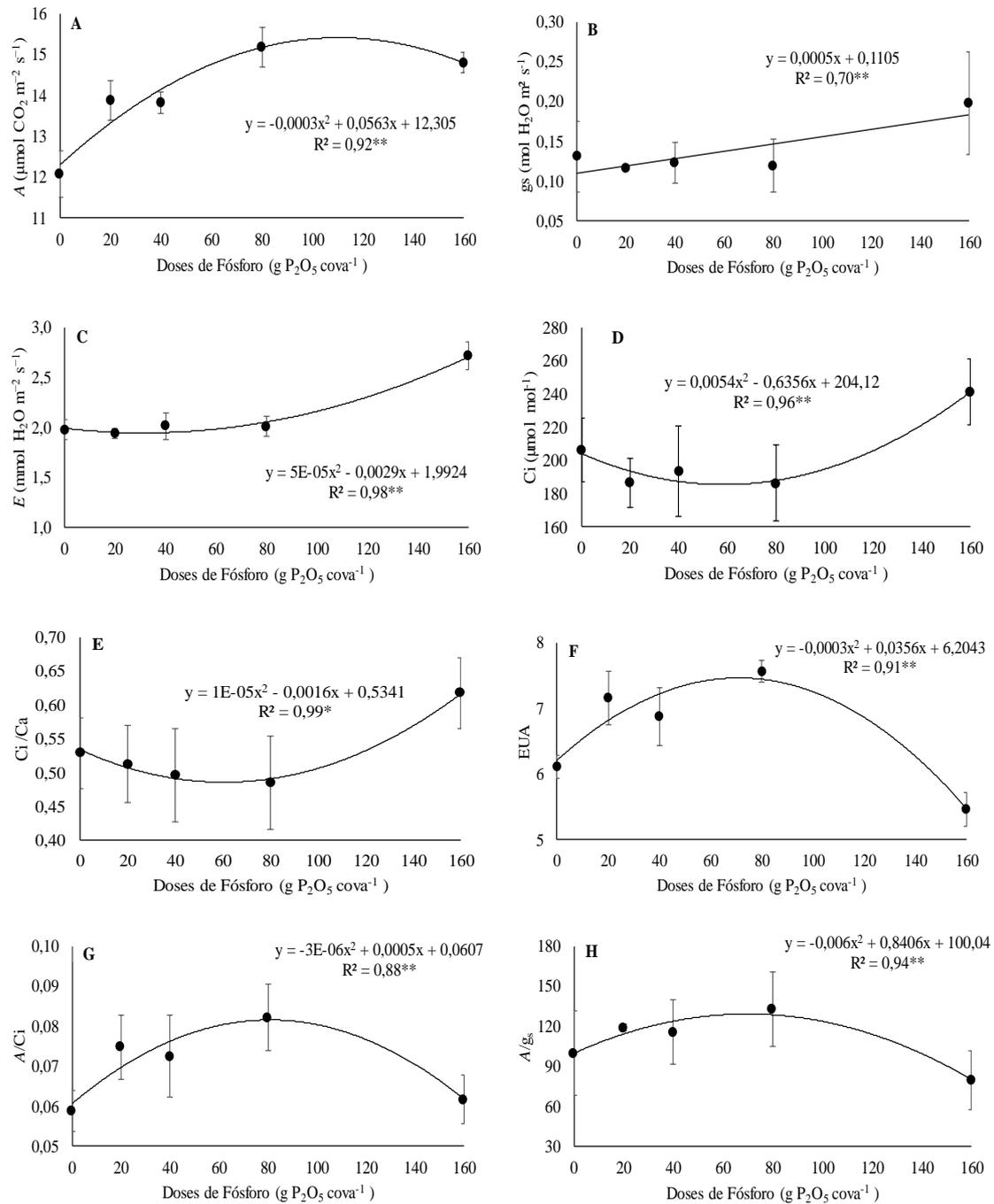
Para a  $E$  houve efeito positivo das doses de fósforo para o cedro indiano adequando ao modelo de regressão quadrático com ponto de mínimo na dose de 20 g de  $P_2O_5$  (Figura 4 C). Para a  $E$  o maior valor observado ocorreu na dose de 160 g de  $P_2O_5$ , sendo 30,41 % superior a dose de 20 g de  $P_2O_5$ .

A  $C_i$  de plantas de cedro indiano foi influenciada pelas doses de fósforo sendo observado maiores valores na dose de 160 g de  $P_2O_5$ , sendo 22,16% superior a dose de 40 g de  $P_2O_5$  que proporcionou menores valores para  $C_i$  de acordo com a equação quadrática (Figura 4 D).

As plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* apresentaram melhores respostas para a EUA na dose de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo 16,75; 8,53; 3,00 e 26,19% superior em relação as doses de 0, 20, 40 e 160 g de  $P_2O_5$ , respectivamente (Figura 4 F). De acordo com equação de regressão observou-se melhor EUA para a dose de 71,20 g de  $P_2O_5$  por planta, proporcionando EUA de 7,47.

A  $A/C_i$  das plantas de cedro indiano diferiu estatisticamente para as doses de fósforo, adequando ao modelo de regressão polinomial de 2º grau (Figura 4 G). Maiores valores de  $A/C_i$  aos 180 dias após transplantio foram observados na dose de fósforo de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo 25,52; 14,72; 6,87 e 21,59% superior as doses de 0, 20, 40 e 160 g de  $P_2O_5$ , respectivamente.

Para a  $A/g_s$  aos 180 dias após transplântio a dose que proporcionou maiores valores foi a de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo 22,38; 11,20; 3,74 e 37,20% superior as doses de 0, 20, 40 e 160 g de  $P_2O_5$ , respectivamente (Figura 4 H).



**Figura 4.** Taxa fotossintética ( $A$ ) –A; Condutância estomática ( $g_s$ ) – B Taxa transpiratória ( $E$ ) –C; concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$ ) – D; relação entre a concentração interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ) -E; Eficiência instantânea do uso da água (EUA) -F; Eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ ) -G e Eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) -H em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F,  $^{**}$  e  $^*$  significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Como o fósforo participa diretamente de processos metabólicos vitais para o desenvolvimento da planta, como transferência de energia, síntese de ácido nucleico e glicose, respiração, síntese e estabilidade da membrana, ativação enzimática e desativação (TAIZ *et al.*, 2017), relacionando diretamente aos parâmetros fisiológicos.

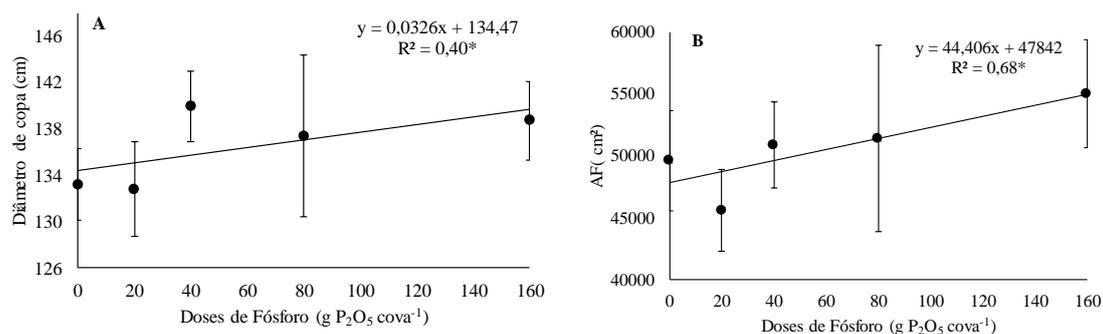
Essa influência observada ocorre pela participação do P no metabolismo das plantas, faz parte do processo de transferência de energia (formação de ATP), estrutura de diversas moléculas orgânicas, compondo membranas e ésteres de carboidratos, sendo fundamental para as atividades celulares e fotossintéticas (TAIZ *et al.*, 2021).

Com o aumento do teor de P disponível no solo, há maior oferta desse elemento para as raízes das plantas e provavelmente maior absorção (PICCIN *et al.*, 2017). Grande parte do P absorvido é transportado e acumulado nas folhas das plantas (VENEKLAAS *et al.*, 2012), proporcionando aumento do metabolismo energético, aumento da divisão celular (MARSCHNER, 2012), condutância estomática (WARREN, 2011) e, conseqüentemente, aumento da síntese de pigmentos fotossintéticos (JIANG *et al.*, 2009), corroborando com os resultados obtidos em que observou incremento na condutância estomática e índice de clorofila b com o aumento das doses de P aplicadas no solo.

Concentrações crescentes de clorofila a e b e carotenoides nas folhas promovem maior absorção e captura de luz em diferentes regiões do espectro nos estágios iniciais do processo fotossintético (TAIZ *et al.*, 2017), ocorrendo maior transferência de energia de ressonância dos complexos de antenas para os centros de reação, e a energia pode ser utilizada para as reações fotoquímicas responsáveis pela produção de biomassa (TAIZ *et al.*, 2017).

O aumento da *E* pode estar relacionado com o aumento da concentração de potássio nas folhas. O potássio, presente nas plantas como o cátion  $K^+$ , desempenha papel importante na regulação do potencial osmótico das células vegetais permitindo maior abertura estomática durante o dia favorecendo a transpiração das plantas (TAIZ *et al.*, 2021).

Observou-se de acordo com equação de regressão incremento para o aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicadas no sulco para as variáveis diâmetro de copa e área foliar (AF) de 0,47 e 1,62%, respectivamente (Figura 5 A e B).



**Figura 5.** Diâmetro de copa – A; Área foliar (AF) – B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média (n = 4) ± EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

A dose que proporcionou maior crescimento nas mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi a de 160 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicados no sulco por planta, indicando que o cedro indiano responde positivamente as doses de adubação fosfatada, obtendo resposta até a dose máxima de P aplicada, não sendo possível estabelecer a dose de máxima eficiência até os 180 dias após o transplântio.

A deficiência de P resulta em lâmina foliar mais curta e estreita, com inibição das gemas axilares causando redução do crescimento e ramificação, resultando em plantas menores (MUNGUAMBE, 2018), conforme observado para as variáveis H, DNS, AF e diâmetro da copa.

Em seus estudos Manguambe, (2018) observou que a lâmina foliar apresentava coloração verde escura, inicialmente colorida e posteriormente os folíolos cloróticos e murchos. Sintomas de deficiência de P ocorre porque este macronutriente desempenha papel importante no metabolismo da energia das plantas, como fotossíntese e respiração (TAIZ *et al.*, 2021) e o crescimento das plantas com deficiência de P é retardado.

Freiberger *et al.* (2014), obteve resultados crescentes para área foliar até a dose de 68 mg. dm<sup>3</sup> de P estudando pinhão-manso (*Jatropha curcas* L.) aos 150 dias após o transplântio. A deficiência de fósforo afeta o crescimento da planta e provoca menor emissão de folhas, com menor área foliar, limitando a captação da radiação solar e, conseqüentemente, menor produção de fotoassimilados (BONFIM-SILVA *et al.*, 2011), corroborando com os resultados encontrados no presente trabalho para diâmetro da copa e área foliar, que tiveram comportamento crescente aos 180 dias após transplântio em relação a doses de P aplicadas.

A AF e o índice de área foliar (IAF) é influenciado pela idade do povoamento, bem como pelo teor de nutrientes nas folhas (GONÇALVES *et al.*, 2013), conforme observado pela relação de P foliar e AF no presente estudo. Após o fechamento da copa, entre 24 e 36 meses após o plantio, os valores do IAF tendem a diminuir até a estabilização (MELO *et al.*, 2016).

Os parâmetros morfológicos de crescimento das plantas em altura da parte aérea (H) e diâmetro a nível do solo (DNS) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* responderam positivamente as doses de fósforo (P) testadas aos 90 dias após o transplântio.

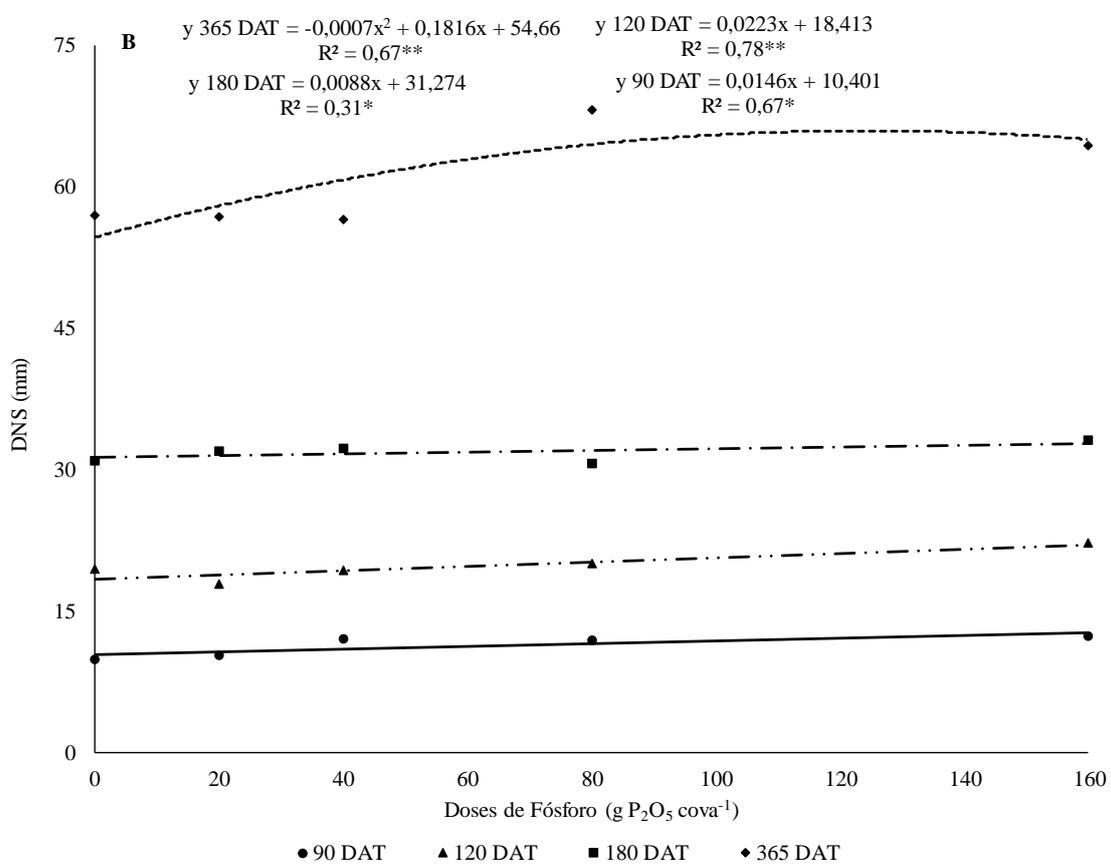
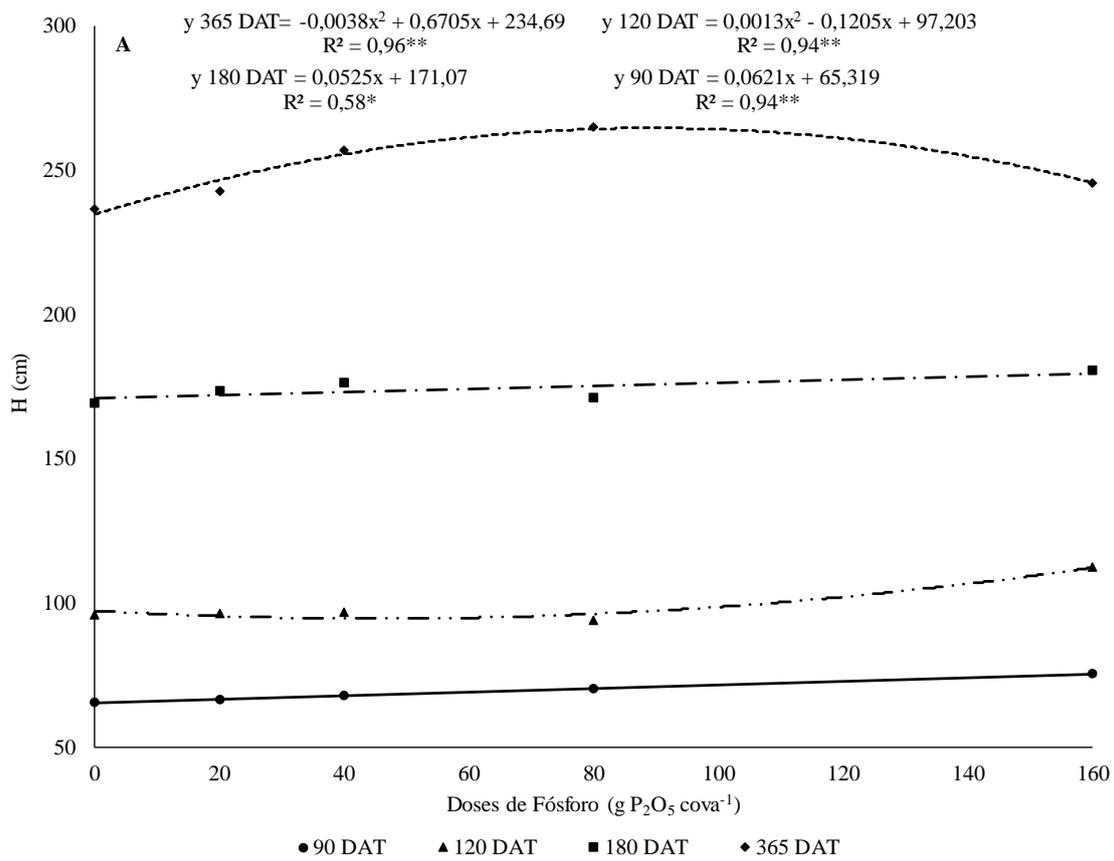
Aos 90 dias após o transplântio das mudas, o incremento foi de 1,65% e 2,29% para o aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicadas por planta para H e DNS, respectivamente (Figura 6 A e B), obtendo melhores resposta com a aplicação de 160 g de  $P_2O_5$  aplicada no sulco por planta.

Para H a dose de 160 g de  $P_2O_5$  proporcionou resultados superiores, sendo esta 13,20; 11,55; 9,90 e 6,60% superior as doses de 0, 20, 40 e 80 g de  $P_2O_5$ . As doses de 0, 20, 40 e 80 g de  $P_2O_5$  demonstraram resultados inferiores para o DNS em relação a dose de 160 g de  $P_2O_5$ .

Aos 120 dias após transplântio a equação de melhor ajuste para H foi a quadrática, a dose de  $P_2O_5$  que promoveu melhor resposta foi a de 160 g de  $P_2O_5$  aplicado por planta. O DNS adequou-se ao modelo de regressão linear proporcionando acréscimo de 2,03 % para o aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicadas no sulco de plantio.

Aos 180 dias após transplântio, observou-se resposta linear positiva com incremento para o aumento de cada 20 g de  $P_2O_5$  aplicadas no sulco para as variáveis H e DNS de 0,58 e 0,54 % respectivamente.

A dose de 80 g de  $P_2O_5$  por planta proporcionou H de 264,01 cm para as plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* aos 365 dias após transplântio, sendo 11,11; 6,60; 3,25 e 7,32 % superior as doses de 0, 20, 40 e 160 g de  $P_2O_5$ , respectivamente (Figura 6 A). Observou-se de acordo com a equação maior H na dose de 88,20 g de  $P_2O_5$  por planta, obtendo 264,27 cm. O maior DNS para aos 365 dias após transplântio foi observado na dose de 124,40 g de  $P_2O_5$  por planta com 66,42 mm (Figura 6 B).



**Figura 6.** Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro ao nível do solo (DNS) -B; em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 90, 120, 180 e 365 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

A deficiência nutricional de P acarreta menor número de folhas e de raízes laterais proporcionando redução na produção de biomassa da parte aérea e conseqüentemente no crescimento (GAZOLA *et al.*, 2015), conforme observado no presente estudo.

Alguns estudos mostram a importância de fósforo no desenvolvimento inicial das plantas, como observado por Cardoso *et al.* (2015), os quais avaliaram o desenvolvimento inicial de mogno (*Swietenia macrophylla* King.), verificando a exigência de doses adequadas de  $P_2O_5$  próximas a  $41,6 \text{ mg dm}^{-3}$  ( $83,2 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}^{-1}$ ), Vasconcelos *et al.* (2017) encontraram o requisito de  $120 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}^{-1}$  de  $P_2O_5$  para mogno africano (*Khaya senegalensis* A. Juss), assim como Moro *et al.* (2014) que obtiveram a dose necessária de  $140 \text{ mg dm}^{-3}$  ( $280 \text{ kg de } P_2O_5/\text{ha}^{-1}$ ) de  $P_2O_5$  para *Pinus taeda*.

Ros *et al.* (2019) avaliando o efeito da adubação fosfatada no crescimento inicial e nutrição das plantas de *Khaya ivorensis* observaram resposta crescente às doses de P para a H e DNS. A adubação fosfatada proporciona aumento do crescimento das plantas quando o teor de P no solo encontra-se abaixo do teor crítico (SBCS, 2016). No caso do solo do presente estudo com teor de  $3,07 \text{ mg dm}^{-3}$  de P (muito baixo) no transplântio das mudas, inferior ao limite crítico ( $4,5 \text{ mg dm}^{-3}$ ), a resposta foi esperada nos parâmetros morfológicos analisados.

Corcioli *et al.* (2014) também verificaram que a aplicação de fósforo foi essencial para desenvolvimento das plantas de *Khaya ivorensis* aos 55 dias após o início dos tratamentos nutricionais.

Aos 120 dias após transplântio Ros *et al.* (2019) observaram em plantas de mogno africano incremento com a dose máxima de P aplicada no solo, de 20,30 e 17,70% para a H e DNS. Para o cedro indiano foram observados aos 120 dias após o transplântio incrementos de 12,60 e 16,23 % para H e DNS respectivamente.

Além de aumentar a concentração na planta, a adubação fosfatada contribuiu para o maior crescimento das plantas, justificando o uso em solos com teores limitantes do nutriente no solo (ROS *et al.*, 2019; DE SOUZA KULMANN *et al.*, 2023). No

entanto, devido ao crescimento das plantas até a dose máxima de P aplicado no solo, não foi possível de estimar a dose de máxima eficiência técnica (DMET).

Em plantas de *Khaya ivorensis* Ros *et al.* (2019) verificaram que o incremento com a dose máxima de P aplicada no solo aos 240 dias após o transplântio das mudas, foi de 14,1 e 15,7% para a H e DNS, respectivamente. Conforme observado por Araújo *et al.* (2021), o preparo convencional, a correção da acidez e a adubação com 108 g de superfosfato simples por planta (120 kg. ha<sup>-1</sup>) resultaram em plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* com melhor crescimento aos 210 dias após o plantio.

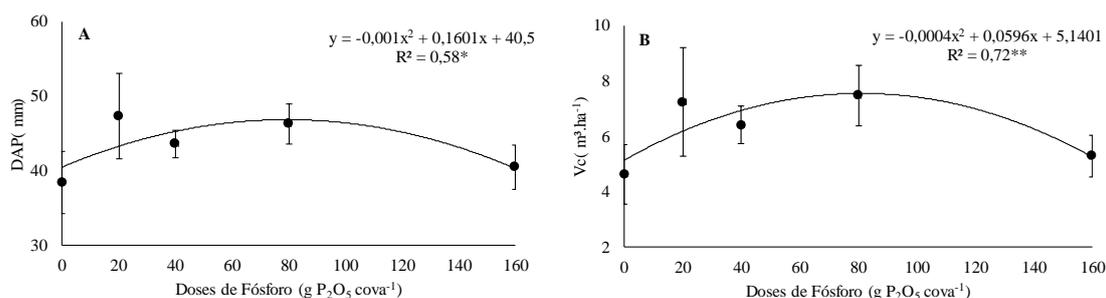
Oliveira *et al.* (2015) observou máximo crescimento no mogno africano foi conseguido mediante as aplicações das doses de P de 100 a 150 kg ha<sup>-1</sup> com ponto de máximo crescimento em altura determinado na dose de 250 kg ha<sup>-1</sup>, resultando em altura máxima estimada de 73 cm aos 180 dias após transplântio. Segundo Oliveira, (2015) plantas de mogno africano apresentaram decréscimos na altura a partir da dose de 250 kg kg ha<sup>-1</sup>, sendo mais intensificado na dose de 400 kg ha<sup>-1</sup>.

No presente estudo observou-se exigência de doses de P adequadas para o cedro indiano próximas a 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> aplicadas no sulco por planta (133 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha<sup>-1</sup>), a qual proporcionou melhores resultados para os parâmetros fisiológicos relacionando-se aos parâmetros de crescimento.

Resultados semelhantes aos obtidos neste estudo foram observados por Araújo *et al.* (2020), os quais observaram aumento para H e DNS em resposta a adubação fosfatada em mudas de *Acacia mangium* até 150 mg. dm<sup>3</sup> (300 kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha). Em mudas de *Eucalyptus benthamii* e *Eucalyptus dunnii*, Dias *et al.* (2015) também observaram resposta positiva das variáveis analisadas para diferentes fontes de fósforo, mostrando a importância do P no desenvolvimento das espécies florestais, uma vez que as plantas apresentaram resposta positiva independente da fonte aplicada.

As variáveis diâmetro na altura do peito (DAP) e Volume cilíndrico com casca (Vc) em função das doses de fósforo testadas demonstraram resposta quadrática aos 365 dias após o transplântio (Figura 7 A e B). Para o DAP a dose de 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta proporcionou resultados superiores, sendo 13,66; 7,69; 3,42 e 13,63% superior as doses de 0, 20, 40 e 160 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente (Figura 7 A).

A dose de 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> proporcionou incremento de 31,95; 18,11; 8,18 e 30,42% no Vc em relação as doses de 0, 20, 40 e 160 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente (Figura 7 B), sendo observado de acordo com equação, maior Vc (7,57 m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>) na dose de 77,20 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta.



**Figura 7.** Diâmetro na altura do peito (DAP) – A; Volume cilíndrico com casca (Vc)–B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 365 dias após o transplântio em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média (n = 4) ± EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

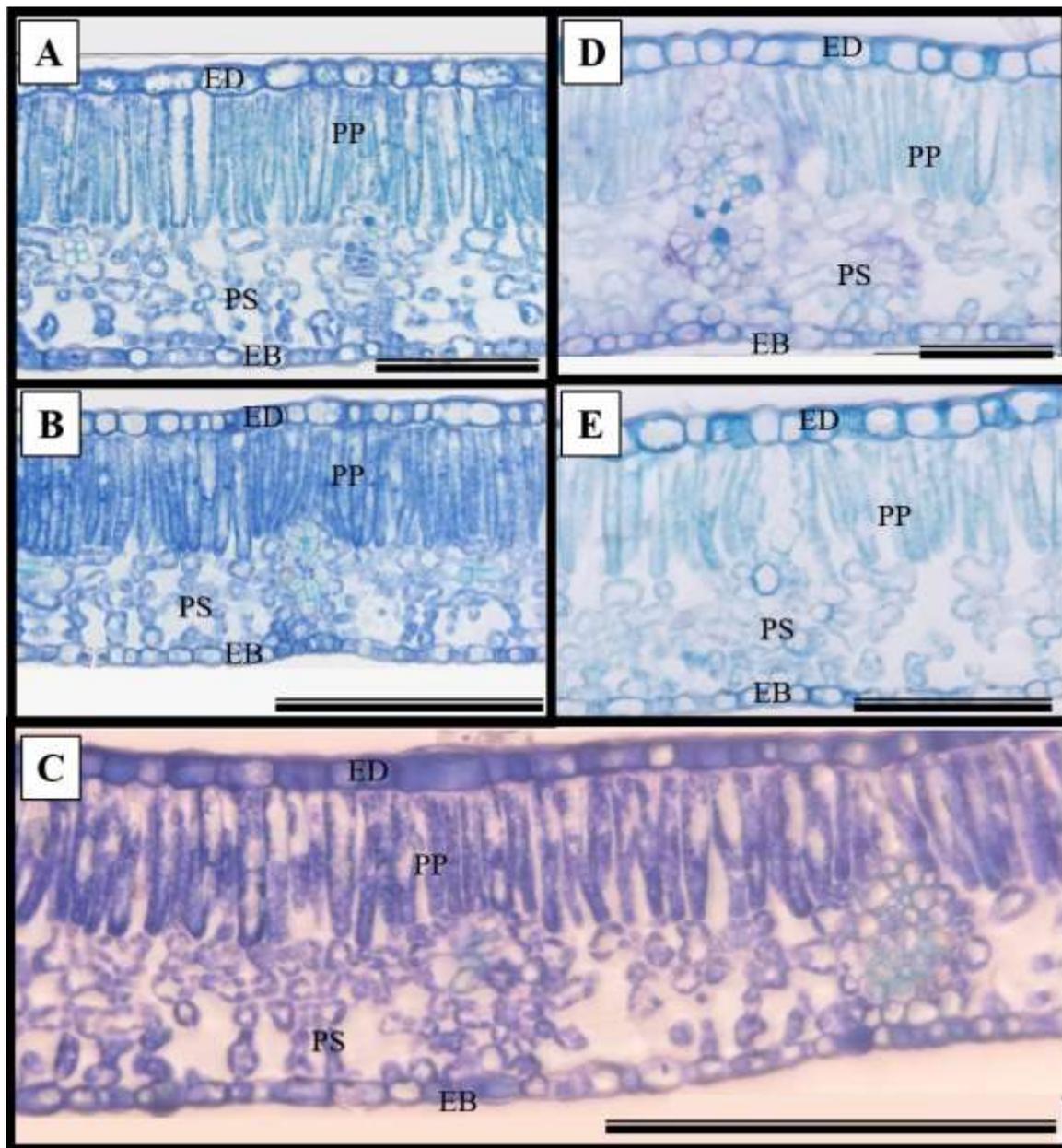
Munguambe, (2018) avaliando crescimento volumétrico da madeira de cedro indiano em Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico típico (LVAd), após fornecimento de P, observou volume de 26,22 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> aos 24 meses após transplântio na dose de 100g por planta. Carlos, (2013), avaliando crescimento volumétrico de jacarandá da Bahia Latossolo Vermelho observou volume cilíndrico de madeira de 0,8 m<sup>3</sup> ha<sup>-1</sup> como maior volume, após aplicação de 93g de P por planta aos doze meses após transplântio.

Aos 12 meses após o transplântio Munguambe, (2018) observou nas mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* maior DNS de 3,14 cm para a dose 47,8 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta, no presente estudo observou-se que a DMET para DNS no mesmo período de avaliação foi obtida na dose de 124,40 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta. O mesmo autor observou aos doze meses a maior altura média foi 1,66 metros na dose 44 g por planta de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, enquanto no presente estudo a DMET para H foi de 88,20 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta no mesmo período.

Vasconcelos *et al.* (2017), em um estudo com aplicação de P nas laterais de cada lado das linhas de plantio, encontraram incremento no crescimento das plantas de *Khaya senegalensi* em H e DAP aos um e dois anos de idade até a dose máxima de P (120 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub> O<sub>5</sub>), corroborando com os resultados obtidos em que foram observados incrementos até a DMET de 147; 207; 133 e 128 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub> O<sub>5</sub> para as variáveis H, DNS, DAP e Vc no primeiro ano de idade respectivamente.

As plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* tiveram “ingestão de luxo” na dose máxima de P, resultando em níveis mais elevados de nutrientes que geralmente não resultam em aumentos na produção de matéria seca (TAIZ *et al.*, 2017), e consequentemente de madeira conforme observado para o Vc no primeiro ano após o transplântio.

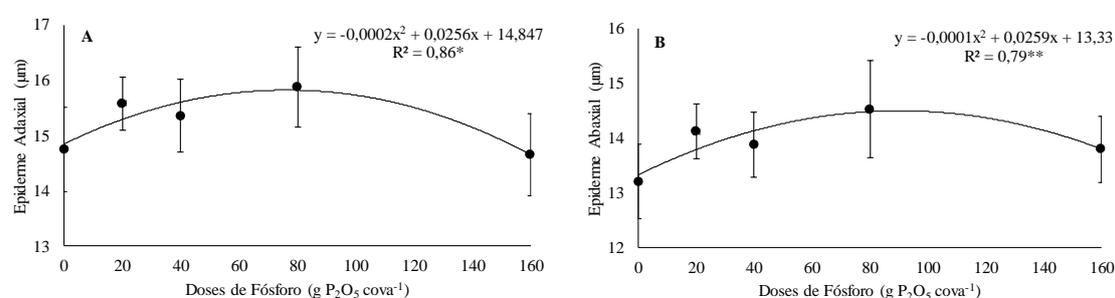
A epiderme foliar de *Acrocarpus fraxinifolius*, em suas faces adaxial e abaxial, é constituída por células isodiamétricas com paredes anticlinais planas ou ligeiramente convexas (Figura 8). O mesofilo é dorsiventral, composto de uma ou duas camadas de parênquima paliçádico formado por células alongadas, nas quais evidenciam idioblastos cristalíferos contendo drusas de oxalato de cálcio. O parênquima esponjoso possui de três a quatro camadas de células, que apresentam formatos irregulares e reduzidos espaços intercelulares.



**Figura 8.** Anatomia das folhas de *Acrocarpus fraxinifolius* 180 dias após o transplântio em resposta a adubaçãofosfatada, sendo (A) 0 g de  $P_2O_5$  por planta, (B) 20 g de  $P_2O_5$  por planta, (C) 40 g de  $P_2O_5$  por planta, (D) 80 g de  $P_2O_5$  por planta e (E) 160 g de  $P_2O_5$  por planta. (ED) epiderme adaxial. (EB) epiderme abaxial. (PP) parênquima paliçádico. (SP) parênquima esponjoso.; (A-E) Barra de escala de 100  $\mu$ m.

A maior espessura da epiderme adaxial e abaxial em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi encontrada nas doses superiores de fósforo aplicada (Figura 9 A e B). Maior espessura da epiderme adaxial foi encontrada na dose de 80 g de  $P_2O_5$ , sendo 4,92; 2,15; 0,41 e 11,48 % superior em relação ao observado nas doses de fósforo de 0, 20, 40, e 160 g de  $P_2O_5$  por planta, respectivamente. De acordo com equação de regressão a dose que proporcionou maior epiderme adaxial para o cedro indiano foi a de 64 g de  $P_2O_5$  por planta, sendo observada espessura de 15,67  $\mu m$ .

Para a espessura da epiderme abaxial foram observados resultados semelhantes e de acordo com a equação de regressão a dose que proporcionou maior epiderme abaxial para o cedro indiano foi a de 129,40 g de  $P_2O_5$  por planta, sendo observada espessura de 15,04  $\mu m$ .



**Figura 9.** Espessura da epiderme adaxial –A; Espessura da epiderme abaxial - B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplante em resposta a adubação fosfatada. Barras representam média (n = 4)  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Conforme observado no cedro indiano, o aumento da epiderme foliar nas doses mais elevadas de fósforo, associou-se a rápida e dinâmica difusão de gases permitindo maiores taxas fotossintéticas (TAIZ et al., 2021). Essa melhoria da estrutura do tecido, a nível histológico das folhas pode estar relacionada com o Ca do superfosfato triplo, que se relaciona com a divisão e crescimento do volume das células, além de apresentar folhas mais delgadas com boa razão de área foliar (ALINIAEIFARD et al., 2020).

#### 4. CONCLUSÃO

As doses de fósforo aplicadas no sulco de plantio apresentaram resposta crescente aos parâmetros morfológicos e fisiológicos avaliados, com maior eficiência técnica na dose de 80 g de  $P_2O_5$  (133 kg. ha $^{-1}$ ) aplicadas no sulco por planta,

demonstrando a importância do fósforo no desenvolvimento inicial e produção de madeira das mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* após transplantio.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALINIAEIFARD S., SHOMALI A., SEFIKALHOR M., LASTOCHKINA O., 2020. Calcium Signaling in Plants Under Drought. In: Hasanuzzaman M., Tanveer M. (eds) Salt and Drought Stress Tolerance in Plants. **Signaling and Communication in Plants**. Springer, Cham.

ALVAREZ, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil**. Meteorologisch Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711- 728, 2014.

ARAÚJO, Geislaine do Carmo Reis et al. Initial Development of *Acrocarpus fraxinifolius* in Function of Soil Preparation and Phosphate Mineral Fertilization. **Floresta e Ambiente**, v. 29, p. e20210082, 2021.

BARBOSA, Gabriela Paranhos et al. Crescimento inicial de espécies florestais para fins de uso múltiplo na região central de Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 25256-25274, 2021.

BARROS OLIVEIRA, Carolina A. et al. Characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* wood submitted to heat treatment. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 24, 2022.

BDMET-INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Instituto Nacional de Meteorologia. Temperaturas máximas e mínimas e umidade relativa do ar anos 2013/2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 12 jun,2022.

BELLOTTE, JOÃO LEONARDO MIRANDA. **Dinâmica nutricional em função da adubação suplementar em povoamentos de eucalipto no cerrado do estado do Mato Grosso do Sul**. 2020.

BENEDETTI, Vanderlei. **Nutrição e fertilização florestal [prefácio]**. Piracicaba: IPEF., 2015.

BERGHETTI, ÁLVARO LUÍS PASQUETTI. **Uso da adubação nitrogenada, fosfatada e potássica em plantios de *Handroanthus heptaphyllus*: Uma abordagem silvicultural e fisiológica**. 125 p., 2020.

BONFIM-SILVA, E. M.; SILVA, T. J. A.; CABRAL, C. E. A.; GONÇALVES, J. M.; PEREIRA, M. T. J. Produção e morfologia da leguminosa Java submetida a adubação fosfatada. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.12, p. 1-10, 2011.

CARDOSO, A.A.S.; SANTOS, J.Z.L.; TUCCI, C.A.F.; FARIAS, E.P.; MOURA, R.P.M. Influência da acidez e do teor de fósforo do solo no crescimento inicial do mogno. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v.35, n.81, p.1-10, 2015. <https://doi.org/10.4336/2015.pfb.35.81.667>.

CARLOS, L.; **Crescimento inicial de Dalbergia nigra sob calagem e adubação com N, P e K em condições controladas e em campo.** 2013. 113 f.

CORCIOLI, G.; BORGES J. D.; JESUS, R. P. Sintomas de deficiência nutricional de macronutrientes em mudas de *Khaya ivorensis* cultivadas em solução nutritiva. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 78, p. 159-164, 2014.

CORCIOLI, G.; BORGES, J. D.; JESUS, R. P. Deficiência de macro e micronutrientes em mudas maduras de *Khaya ivorensis* estudadas em viveiro. **Cerne**, Lavras, v. 22, n. 1, p. 121-128, 2016.

COSTA, Andréia Mendes da. **DOSES DE URÉIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E CLORETO DE POTÁSSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E NO ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA.** 2020.

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina.** 11.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

Davide AC, Silva EAA. **Produção de sementes e mudas de espécies florestais.** Lavras: Ufla 2008.

DA ROS, Clovis Orlando et al. Effect of liming and phosphate fertilization on initial growth and nutrition of *Khaya ivorensis* plants. **Scientia Forestalis**, n. 123, p. 430-439, 2019.

DA SILVA ARAÚJO, Matheus et al. Crescimento e eficiência nutricional de mudas de acácia em resposta à adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 15, n. 2, p. 7503, 2020.

DA SILVA ARAÚJO, M., DA SILVA OLIVEIRA, C., JÚNIOR, J. E. D. C., DE MATTOS BARRETO, V. C., & RODRIGUES, F. Fósforo no crescimento inicial de mogno-africano. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 1, p. 1301-1309, 2021.

DA SILVA ARAÚJO, M., CUSTÓDIO, J. P. C., DOS SANTOS, B. F. A., PELÁ, A., & CONEGLIAN, A. Crescimento e eficiência nutricional de mudas de acácia em resposta à adubação fosfatada. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias (Agrária)**, v. 15, n. 2, p. 7503, 2020.

DA SILVA, Fábio Cesar et al. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009., 2009.

DE OLIVEIRA, M.R.R et al. Physical-mechanical properties of panels produced with corn cob particles and different types and contents of adhesives. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e541101119828-e541101119828, 2021.

DE SOUZA KULMANN, Matheus Severo et al. Aspects of soil fertility and nutrition of *Pinus taeda* L: A review. **Revista Ecologia e Nutrição Florestal-ENFLO**, v. 11, p. e02-e02, 2023.

DIAS, L.P.R.; Gatiboni, L.C.; Brunetto, G.; Simonete, M.A.; Bicaratto, B. Eficiência relativa de fosfatos naturais na adubação de plantio de Mudanças de *Eucalyptus dunnii* maiden e *Eucalyptus benthamii* maiden et cambagem em solo sem e com calagem. **Ciência Florestal**, v.25, n.1, p. 37-48, 2015. <https://doi.org/10.1590/1980>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do Eucalipto: sistema de produção**, 4. 2. ed. [S. 1.], 2010.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathol**, Botucatu, v. 41, n. 2, p. 160, 2015.

FREIBERGER, Mariângela Brito et al. Adubação fosfatada no crescimento inicial e na nutrição de mudas de pinhão-manso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 232-239, 2014.

GAZOLA, R. N.; BUZETTI, S.; TEIXEIRA FILHO, M, C.; DINALLI, R. P.; MORAES, M. L. T.; CELESTRINO, T. S.; SILVA, P. H. M.; DUPAS, E. Doses de N, P e K na cultura do eucalipto em solo originalmente sob Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 36, n. 3, suplemento 1, p. 1895-1912, 2015.

GONÇALVES, J. L. DE M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, 2013.

JIANG HX, TANG N, ZHENG JG, LI Y, CHEN LS. O fósforo alivia a inibição do crescimento e da fotossíntese induzida pelo alumínio em mudas de *Citrus grandis*. **Fisiologia da Botânica** 2009;137(3):298-311.

LIMA, G. S. **Deficiência hídrica em plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L) fertirrigadas e seus efeitos sobre a produção de massa e parâmetros bioquímicos**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Agronomia). Faculdade de Ciência Agronômicas. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Botucatu, 2013.

LINCOLN TAIZ, EDUARDO ZEIGER, IAN MAX MØLLER, ANGUS MURPHY, **Fundamentos de Fisiologia Vegetal** - 6. ed. N.p., Artmed Editora, 2021.

MARSCHNER, P. A - Marschner ' s Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**, v. 3 rd Ed, p. 651, 2012.

MARTÍNEZ PE, GARCÍA JMM, SÁNCHEZ LH, PÉREZ GO. **Cultivo intercalado de cedro rosado y su efecto sobre el contenido de materia orgánica en suelo**. **Revista UDO Agrícola** 2006; 6 (1): 109-113.

MELO, E. A. S. C. DE et al. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 1–15, 2016.

MORO, Letícia et al. Resposta de Pinus taeda com diferentes idades à adubação NPK no Planalto Sul Catarinense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 1181-1189, 2014.

MUNGUAMBE, J.F. **Mineral nutrition of *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. grown in greenhouse and under field fertilization/** João Faustino Munguambe - 2018. 131 p.: il.

NAVARRO GARCÍA, S., NAVARRO GARCIA, G. **Química agrícola: química del suelo y de los nutrientes esenciales para las plantas.** Espanha: Ediciones Mundi-Prensa. (2013). P. 306

OLIVEIRA, Cleiton da Silva. **Efeito do fósforo no desenvolvimento inicial de plantas de mogno-africano.** 2015. 28 f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Unidade Ipameri, Universidade Estadual de Goiás, Ipameri-GO.

PICCIN R, KAMINSKI J, CERETTA C.A, TIECHER T, GATIBONI LC, BELLINASSO RJS, et al. Distribuição e redistribuição de formas de fósforo em videiras. **Scientia Horticulturae.** 2017.

PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; SITPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes.** Piracicaba: IPNI, 2014. v. 3, 467 p.

RAI SN. Pre-treatment of *Acrocarpus fraxinifolius* seeds. **Indian-Forester** 1976; 102(80):488 491.

ROS, C. O da, SESTARI, G., JAEGER, C., OLIVEIRA, E. H., WEBER, M. L., SILVA, R.F., TORCHELSEN, M. (2019). Efeito da calagem e da adubação fosfatada no crescimento inicial e na nutrição das plantas de *Khaya ivorensis*. **Scientia Forestalis.** 47. 10.18671/scifor.v47n123.05.

SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3.ed. Rio de Janeiro EMBRAPA Solos, 2013. 353 p.

SANTOS, Victor Galvão dos. **Aproveitamento da água residual da termorreificação do cedro indiano e avaliação do potencial de aplicação como biofertilizante.** 2023.

SBCS – SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. **Manual de calagem e adubação para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina.** 11 ed. Frederico Westphalen: Núcleo Regional Sul, Comissão de Química e Fertilidade do Solo, 2016. 376 p.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2. ed. Brasília DF, Embrapa Informação Tecnológica, 2009, 627p.

STAHL, J. et al. Produção de massa seca e eficiência nutricional de clones de *Eucalyptus dunnii* e *Eucalyptus benthamii* em função da adição de doses de fósforo ao solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 23, n. 2, p. 287–295, 2013.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAIZ, Lincoln et al. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal-6**. Artmed Editora, 2021.

THEBALDI MS, LIMA LA, COLARES MFB, SILVA AC, LIMA PLT. Dinâmica das propriedades de um substrato florestal exposto à irrigação. **Ciência Florestal** 2015; 25 (2): 375-384. 10.5902 / 1980509818456

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M de; PRATA, J. G. Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus* spp. para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 343-350, setembro, 2011.

VASCONCELOS, R. T.; VALERI, S. V.; CRUZ, M. C. P.; BARBOSA, J. C.; BARRETTO, V. C. Fertilização fosfatada na implantação de *Khaya senegalensis* A. Juss. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 45, n. 116, 2017.

VENTURIN, N.; CARLOS, L. SOUZA, P. A. de; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P. HIGASHIKAWA, E. M. **Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades**. *Cerne Lavras*, vol.20 n. 4, oct- dec. 2014.

VENEKLAAS E.J, LAMBERS H., BRAGG J., FINNEGAN P.M, LOVELOCK C.E, PLAXTON W.C, et al. **Oportunidades para melhorar a eficiência do uso de fósforo em plantas cultivadas**. 2012.

WARREN C.R. Como o P afeta os perfis de fotossíntese e metabólitos de *Eucalyptus globulus*. **Fisiologia da Árvore**. 2011; doi: 10.1093/treephys/ tpr064.

ZAMBROSI, F. C. B. Adubação com fósforo em cana-soca e sua interação com magnésio. **Bragantia**, Campinas, v. 71, n. 3, p. 400 - 405, 2011.

CAPÍTULO II  
ADUBAÇÃO NITROGENADA EM *Acrocarpus fraxnifolius* MART. APLICADA  
NO SULCO DE PLANTIO

## RESUMO

Árvores de alto valor comercial madeireiro como o *Acrocarpus fraxinifolius* (cedro indiano) podem apresentar baixo crescimento quando cultivadas em solos com baixa disponibilidade de nitrogênio mineral. Em cultivos florestais no Brasil as áreas destinadas ao plantio possuem baixo teor de matéria orgânica e conseqüentemente baixo fornecimento de nitrogênio as plantas. Assim, o estudo teve como objetivo definir o crescimento e respostas fisiológicas em plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a fertilização nitrogenada mineral com ureia no plantio. O plantio foi realizado em delineamento blocos ao acaso, com quatro repetições de 10 plantas em cada unidade experimental. Os tratamentos testados foram cinco doses de N (0; 11; 22; 45 e 90 g de N por planta) aplicadas no sulco de plantio. As avaliações morfológicas de altura da parte aérea e diâmetro ao nível do solo foram avaliados aos 90; 120 e 180 e 365 dias após o transplântio das mudas, enquanto a área foliar, diâmetro de copa, os índices de clorofila, parâmetros fisiológicas, anatômicos e teores de macronutrientes foliar foram avaliados aos 180 dias após o transplântio. Os parâmetros morfológicos de diâmetro a altura do peito e volume cilíndrico de madeira com casca foram mensurados aos 365 dias após o transplântio. Efeitos positivos da adição de doses de N foram observados para a taxa fotossintética a partir do 6º mês após o transplântio. No primeiro ano após o transplântio a dose nitrogenada de maior eficiência técnica foi a de 22 g de N por planta aplicadas no sulco (37 kg de N ha<sup>-1</sup>) proporcionando maior crescimento e volume de madeira.

**Palavras-chave:** matéria orgânica; eficiência, fertilidade; volume; madeira.

### ABSTRACT

Trees with high commercial timber value such as *Acrocarpus fraxinifolius* (Indian cedar) may show low growth when cultivated in soils with low availability of mineral nitrogen. In forestry crops in Brazil, the areas destined for planting have a low level of organic matter and consequently a low supply of nitrogen to the plants. Thus, the study aimed to define the growth and physiological responses in *Acrocarpus fraxinifolius* plants subjected to mineral nitrogen fertilization with urea at planting. Planting was carried out in a randomized block design, with four replications of 10 plants in each experimental unit. The treatments tested were five N doses (0; 11; 22; 45 and 90 g of N per plant) applied in the planting furrow. Morphological assessments of shoot height and diameter at ground level were evaluated at 90; 120 and 180 and 365 days after transplanting the seedlings, while leaf area, crown diameter, chlorophyll indices, physiological and anatomical parameters and leaf macronutrient content were evaluated at 180 days after transplanting. The morphological parameters of diameter at breast height and cylindrical volume of wood with bark were measured 365 days after transplanting. Positive effects of adding N doses were observed for the photosynthetic rate from the 6th month after transplanting. In the first year after transplanting, the nitrogen dose with the highest technical efficiency was 22 g of N per plant applied in the furrow (37 kg of N ha<sup>-1</sup>), providing greater growth and wood volume.

**Keywords:** organic matter; efficiency, fertility; volume; wood.

## 1. INTRODUÇÃO

O *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. é pertencente à família Fabaceae, subfamília Caesalpinioideae, popularmente conhecido como cedro indiano, guijarra, lazcar ou mundane (MARTÍNEZ *et al.*, 2006; FIRMINO *et al.*, 2015), a árvore adulta é reta e atinge, em média, 15 a 20 m de altura e 30 a 50 cm de diâmetro (DE OLIVEIRA *et al.*, 2021).

A espécie tem despertado interesse por ser uma espécie florestal de crescimento rápido e bem adaptada as condições brasileiras (VENTURIN *et al.*, 2014) além de apresentar grande potencial madeireiro, pelas características tecnológicas, massa específica básica de 0,458 g/cm<sup>3</sup>, baixa estabilidade dimensional e boa resistência mecânica (TRIANOSKI *et al.*, 2011; BARROS OLIVEIRA *et al.*, 2022; SANTOS, 2023).

A silvicultura tem papel primordial, na busca por alternativas para produzir mudas de grande qualidade, altas taxas de sobrevivência e produtividade (THEBALDI *et al.*, 2015). A introdução de espécies exóticas com potencial florestal já conhecidas em outros países, é ótima alternativa para atender as demandas de mercado (VENTURIN *et al.*, 2014; BARBOSA *et al.*, 2021).

No solo a maior quantidade de nitrogênio (N) está ligada a compostos orgânicos (N-orgânico) que podem ser transformados pelos microrganismos em N-mineral, pelo processo de mineralização ((MARSCHNER, 2012), dependendo do teor de matéria orgânica (M.O) no solo. Os plantios florestais no Brasil, de forma geral, estão implantados em solos de baixa fertilidade (BELLOTE, 2020) e baixo teor de M.O, assim o fornecimento N via adubação é necessária para o adequado desenvolvimento das plantas (PROCHNOW, CASARIN & SITPP, 2014; GONÇALVES *et al.*, 2008).

Para as espécies arbóreas, pesquisas demonstram que a baixa disponibilidade de N interfere severamente no crescimento e no acúmulo de matéria seca das plantas (DA SILVA MORETTI *et al.*, 2015;) considerando que faz parte da estrutura da molécula de clorofila, pigmento responsável pela absorção da luz solar (MALAVOLTA, 2006; TAIZ *et al.* 2017; GONÇALVES *et al.*, 2013).

O teor de N nas folhas pode estar abaixo do nível apropriado, causando a redução acentuada na atividade fotossintética, podendo reduzir o crescimento e produção de madeira (RAZAQ *et al.*, 2017; TOCA *et al.*, 2018). Entretanto, a melhor

dose de N a ser aplicada ou os impactos da fertilização com N sobre o crescimento e os atributos fisiológicos em *Acrocarpus fraxinifolius* não são conhecidos.

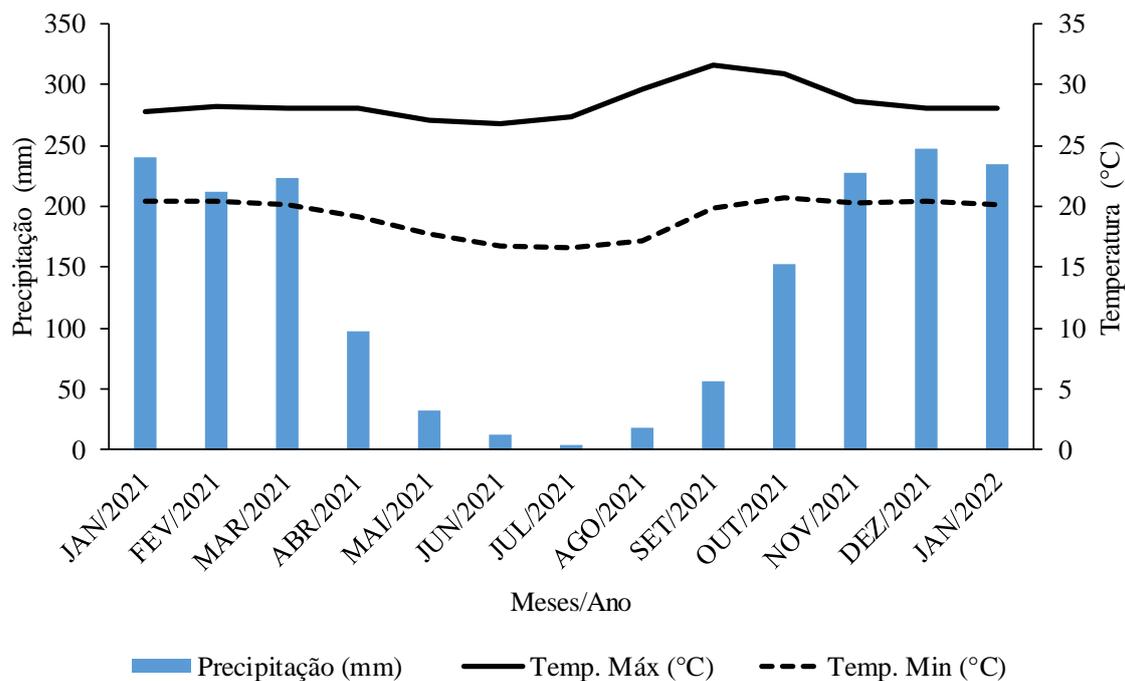
Acredita-se que em plantios florestais o aumento na disponibilidade de N em o solo através da fertilização aumenta a altura, o diâmetro do caule e a alocação de biomassa dentro das plantas (BERGHETTI *et al.*, 2021). Isto pode ser esperado porque parte das formas de N derivadas do fertilizante podem ser absorvidas pelas raízes, aumentando a concentração de N no interior da planta (RAZAQ *et al.*, 2017; TOCA *et al.*, 2018).

O aumento da concentração de N no tecido foliar promove a formação de cloroplastos e pigmentos fotossinteticamente ativos durante o crescimento foliar (LI *et al.* 2018; RAZAQ *et al.* 2017; TEIXEIRA FILHO *et al.*, 2011). Como resultado, as plantas demonstram maior capacidade de absorção de energia luminosa e utilização posterior em reações fotoquímicas (LI *et al.*, 2018). Assim, tendem a apresentar maiores taxas fotossintéticas e de assimilação de carbono, aumentando a taxa de desenvolvimento das plantas (BUENO *et al.* 2019; GAN *et al.*, 2016; RAZAQ *et al.*, 2017).

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar o efeito da adubação nitrogenada aplicada no plantio no crescimento e parâmetros fisiológicos em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* em Latossolo Vermelho distrófico (LVd) de textura média na região Centro-Oeste.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no viveiro do Laboratório de Cultura de Tecidos Vegetais e na área experimental do Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde- GO, Brasil (17°47' S e 50 54' W) nos período de setembro de 2020 a janeiro de 2022. O clima da região de estudo é do tipo Aw (Köppen), com uma estação chuvosa, dezembro a fevereiro, com precipitação superior a 250 mm por mês, uma estação seca, de maio a setembro, com verões brandos e invernos secos. As médias anuais de precipitação temperatura são respectivamente 1529,5 mm e 22,4°C, (ALVAREZ *et al.*, 2014). A temperatura média anual do ar e a precipitação total no período de estudo foram de 23,4°C e 1759 mm, respectivamente (Figura 1).



**Figura 1.** Valores médios de precipitação acumulada (mm), temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) do ar durante o período de condução do plantio de plantas *Acrocarpus fraxinifolius* no campo.

Fonte: BDMET-INMET (2022)

As sementes de *Acrocarpus fraxinifolius* utilizadas neste estudo foram coletadas no pomar de sementes localizado na Universidade Federal de Lavras, logo após a coleta foram beneficiadas seguindo recomendações de Davide e Silva (2008). A quebra da dormência foi realizada em ácido sulfúrico concentrado por 10 minutos (Rai, 1976). O substrato utilizado nos experimentos foi o Bioplant (substrato comercial) e na área experimental o solo foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) seguindo sistema brasileiro de classificação dos solos (SANTOS, 2013).

A produção das mudas teve início no mês de setembro de 2020 no viveiro do laboratório de cultura de tecidos no Instituto Federal Goiano- Campus Rio Verde, foram semeadas três sementes em tubetes de 55 cm<sup>3</sup> contendo substrato comercial Bioplant com casca de arroz carbonizada na proporção de 2:1 e aos 10 dias após à semeadura foi feito o desbaste deixando uma única muda. As adubações de base nas mudas produzidas foram feitas de acordo com a fertilização usada no viveiro florestal da ESALQ proposta por Benedetti, (2015). As mudas foram mantidas em viveiro até os 120 dias tendo em média 20 cm de altura e 3,5 mm de diâmetro do coleto (DC).

Foram realizadas análises químicas e físicas do solo (tabela 1) 70 dias antes da implantação do experimento, para caracterização do solo, segundo Santos *et al.*, (2013). As amostras foram coletadas de dez pontos diferentes da camada de 0-20 e 20-40 cm e realizada análise da composição química (EMBRAPA, 2010). As análises químicas foram realizadas de acordo com os métodos seguintes: pH (H<sub>2</sub>O - Proporção 1: 2,5); matéria orgânica (método de Walkley & Black); P e K (G HCl 0,05 molc<sup>-1</sup> + H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 0,025 molc L<sup>-1</sup>); Ca Mg, Al e H + Al (extrator KCl 1 molc L<sup>-1</sup>) conforme Embrapa (2010). Uma análise física foi realizada para determinar o tamanho de partícula do solo seco ao ar de acordo com o método de pipeta.

**Tabela 1.** Característica química da amostra de um Latossolo Vermelho distrófico (LVd) da área de experimental, na profundidade de 0-20 cm e 20-40 cm.

Profundidade em cm	pH	K	P	Cu	Mg	Al	H-Al		
	(H <sub>2</sub> O)	mg/dm <sup>3</sup>			cmolc/dm <sup>3</sup>				
0-20	5.40	254.65	3.07	3.36	1.19	0.10	5.20		
20-40	5.50	160.85	1.92	2.94	1.03	0.10	3.60		
	SB	t	T	V	m	MO	P-Rem		
		cmolc/dm <sup>3</sup>			%			mg/L	
0-20	5.2	5.3	10.4	50.03	1.89	2.07	14		
20-40	4.38	4.48	7.98	54.92	2.23	1.69	12.7		
	Zn	Fe	Cu	B	S	Argila	Silte	Areia	
		mg/dm <sup>3</sup>			%				
0-20	5.6	14.6	1.98	0.05	7.3	32	14	54	
20-40c	3.4	15.8	1.83	0.04	8.6	*	*	*	

pH em água, KCl e CaCl<sub>2</sub> - Relação 1:2,5 P- Na - K- Fe - Zn- Mn- Cu- Extrador Mehlich 1 Ca - Mg- Al- Extrator: KCl - 1 mol/L H + Al- Extrator: SMP SB= Soma de Bases Trocáveis CTC (t) - Capacidade de Troca Catiônica Efetiva CTC (T) - Capacidade de Troca Catiônica a pH 7,0 V= Índice de Saturação de Bases m= Índice de Saturação de Alumínio Mat. Org. (MO) - Oxidação: Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> 4N+ H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 10N P-rem: Fósforo Remanescente B- Extrator água quente S - Extrator - Fosfato monocálcio em ácido acético Solo Tipo 2: Textura Média.

As mudas foram transplantadas na área experimental, utilizando delineamento em blocos ao acaso (DBC), com 5 doses, 4 blocos e 10 plantas por bloco, sendo as doses de nitrogênio (0; 11; 22; 45 e 90 g de N por planta aplicadas no sulco de plantio) aplicadas na adubação de plantio.

A fonte de nitrogênio utilizada na adubação nitrogenada foi a ureia. A adubação básica com macro e micronutrientes foi balanceada visando todas as plantas receberem a mesma adubação, com exceção dos tratamentos segundo recomendação Embrapa, (2010) aplicando 80 g de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> por planta utilizando o superfosfato triplo.

As mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foram transplantadas manualmente, utilizando espaçamento 2x3 m. As parcelas constituídas de área total de 30 m<sup>2</sup> (3 x 10

m), totalizando 10 plantas. O controle de formigas foi realizado periodicamente com o uso de iscas granuladas, distribuídas dentro e nas proximidades da área experimental. Para o controle de plantas invasoras será feita aplicações de Roundap® na dose de 2,0 L ha<sup>-1</sup> do produto comercial, e capinas manuais quando necessário. O coroamento das mudas na área experimental também foi feito periodicamente quando necessário.

O parâmetros morfológicos de altura da parte aérea (H), diâmetro ao nível do solo (DNS) foram realizados aos 120; 180 e 365 dias após o transplântio. A H foi medida com trena métrica e o DNS com o auxílio de um paquímetro digital (precisão de 0,01 mm) até os 365 dias após o transplântio. O diâmetro de copa foi estimado a partir de duas medições cruzadas da copa, com trena métrica aos 180 dias após o transplântio.

Para a área foliar, foram medidos o comprimento e largura de três folhas, selecionadas aleatoriamente, na qual a primeira folha sendo da parte superior, a segunda da parte mediana, e a terceira da parte inferior da copa, de acordo com Lima (2013), aferindo o comprimento e largura médias para obtenção do produto do CF pela LF em cm<sup>2</sup> que foram em seguida multiplicados pelo NF para obtenção da área foliar total. A mensuração da área foliar total das plantas foi realizada aos 180 dias após o transplântio.

O diâmetro na altura do peito (DAP) foi mensurado aos 365 dias após o transplântio com o auxílio de fita dendrométrica e paquímetro. O volume cilíndrico com casca (m<sup>3</sup>. ha<sup>-1</sup>) das árvores foi determinado aos 365 dias após o plantio utilizando a equação genérica para cálculo de volume cilíndrico, sendo  $V_c = H * [(\pi * DAP^2) / 4]$ .

Os índices de clorofila foram avaliados aos 180 dias após o transplântio com medidor portátil, ClorofiLOG1030® (Falker®, Porto Alegre, Brasil), medindo a quantidade de clorofila a; b e totais em folhas do terço médio da planta. As medições das variáveis morfológicas e índices de clorofila foram realizadas em todas as plantas e calculadas as médias para cada tratamento.

As trocas gasosas das plantas foram mensuradas aos 180 dias após transplântio para estimar as variáveis de taxa fotossintética ( $A$ ,  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), taxa transpiratória ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ), a concentração interna de CO<sub>2</sub> ( $C_i$ ,  $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ) e a relação entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> ( $C_i/C_a$ ), em folhas completamente expandidas no terço médio da planta. A partir desses dados foi possível calcular a eficiência instantânea do uso da água (EUA =  $A/E$ ), a eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) e a eficiência instantânea de carboxilação; ( $A/C_i$ ) (Machado *et al.*, 2005). As medições foram realizadas utilizando

analisador de gases ao infravermelho (LI-6400XTR, Licor®, Lincoln, Nebraska, EUA), utilizando radiação fotossinteticamente ativa (PAR) constante (1000  $\mu\text{mol}$  fótons  $\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ), concentração atmosférica de  $\text{CO}_2$  (Ca) ( $\sim 430 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), temperatura ( $\sim 25^\circ\text{C}$ ) e umidade ( $\sim 65\%$ ) ambientes.

Para o teor de macronutrientes foram coletadas aos 180 dias após o transplântio folhas do terço médio de cada planta da parcela obtendo-se uma amostra composta que foram em seguida colocadas em estufa a  $70^\circ\text{C}$  por 72 horas até massa constante. Após a secagem, as amostras foliares foram pesadas em balança de precisão (0,01 g), moídas e quantificadas as concentrações de N, K, Ca e Mg por meio de extração com  $\text{H}_2\text{SO}_4$  concentrado, usando 0,2 g de material triturado em moinho tipo Willey, com peneira de malha de 0,5 mm.

A determinação do N total foi realizada pelo método do microdestilador e titulação com  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , o K por fotometria de chamas e o Ca e Mg por espectrometria de absorção atômica, conforme metodologias para análise química de tecido vegetal descrita em Da Silva *et al.* (2009).

Para as análises morfoanatômicas foram coletadas amostras foliares de  $3 \text{ cm}^2$  da região central da última folha totalmente expandida de todas as repetições ( $n=4$ ) de cada tratamento ( $n=5$ ) das plantas de cedro indiano (*Acrocarpus fraxinifolius*) aos 180 dias após o transplântio. Inicialmente as amostras foram fixadas em  $\text{FAA}_{70}$  por 24 horas. Após este período, o material vegetal foi pré-lavado em tampão fosfato (0,1 M, pH 7,2) e desidratado em série etílica crescente (30% a 100%), pré-infiltrado e infiltrado em historesina (Leica, Alemanha), conforme as recomendações do fabricante.

Posteriormente, as amostras foram seccionadas transversalmente a  $5 \mu\text{m}$  de espessura em micrótomo rotativo (Modelo 1508R, Logen Scientific, China) e os cortes corados com azul de toluidina - coloração policromática (0,05% tampão fosfato 0,1 M, pH 6,8) (O'Brien *et al.*, 1964). As imagens foram obtidas através do microscópio Olympus (BX61, Tokyo, Japão) acoplado com câmera DP-72 utilizando opção de campo claro. Posteriormente, foram realizadas observações morfoanatômicas da epiderme de ambas as faces e parênquima clorofiliano.

As medidas de micromorfometria foram obtidas a partir das imagens capturadas usando o software ImageJ (Processamento e Análise de Imagem em Java, v. 1.47, EUA). Foram realizadas medições em dez observações por repetição para cada estrutura avaliada.

Os dados foram submetidos à análise de variância e quando detectados efeitos significativos dos tratamentos, foram ajustadas equações de regressão. Os dados foram processados pelo programa SAS® (Statistical Analysis System).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os parâmetros fisiológicos, morfológicos, anatômicos, avaliados apresentaram respostas a adubação nitrogenada aplicada no plantio.

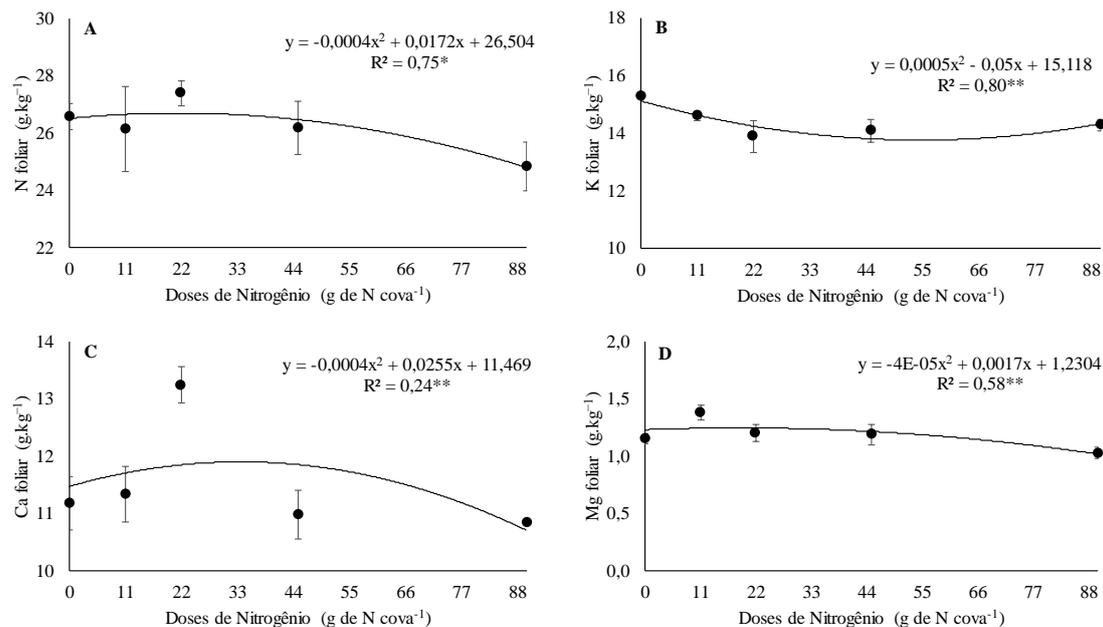
O teor de nitrogênio foliar (N foliar), teor de potássio foliar (K foliar), teor de cálcio foliar (Ca foliar) e o teor de magnésio foliar (Mg foliar) em plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio ajustaram-se ao modelo de regressão quadrática, em resposta as doses de nitrogênio aplicadas por planta no sulco de plantio (Figura 2 A, B, C e D).

O maior valor para N foliar ( $26,69 \text{ g.kg}^{-1}$ ) foi observado na dose de 22 g de N por planta, sendo 0,69; 0,17; 0,83 e 7,03% superior em relação as doses 0, 11, 45 e 90 g de N por planta.

Foi observada redução no K foliar até a dose de 50 g de N por planta com valores de  $13,87 \text{ g.kg}^{-1}$ . A dose de 0 g de N por planta proporcionou maiores valores para o K foliar, sendo 3,24; 5,68; 8,19 e 2,98% superior as doses 11, 22, 45 e 90 g de N por planta.

Em doses maiores que 45 g de N por planta foram observados decréscimos no Ca foliar. A dose de 45 g de N por planta proporcionou resultados superiores para o Ca foliar ( $11,84 \text{ g.kg}^{-1}$ ), sendo 3,10; 1,14; 0,25 e 11,09% maior em relação as doses de 0, 11, 22 e 90 g de N. Para o Mg foliar a dose que proporcionou maior valor foi a dose de 45 g de N por planta<sup>-1</sup>, sendo 1,45; 0,33; 1,81 e 15,14% superior as doses 0; 11; 22 e 90 g de N por planta<sup>-1</sup>.

As concentrações de N nas folhas das plantas para todas as doses testadas após o transplântio, encontram-se dentro faixa ideal sugerida para o gênero *Eucalyptus* spp., que varia entre 21 e  $30 \text{ g kg}^{-1}$  (MELO et al., 2016), demonstrando que mesmo sem a aplicação de N no plantio as plantas de cedro indiano apresentaram concentrações ideais de N nas folhas.



**Figura 2.** Teor de nitrogênio foliar (N foliar) –A; Teor de potássio foliar (K foliar) – B; Teor de cálcio foliar (Ca foliar) –C; Teor de magnésio foliar (Mg foliar) – D em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o plantio em campo, em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média (n = 4) ± EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Maiores concentrações de N nas folhas de *Handroanthus heptaphyllus* no 6° (57,8 g kg<sup>-1</sup>) e 12° (42,1 g kg<sup>-1</sup>) meses após transplântio foram observadas nas plantas com DMET de 155,7 e 270,0 kg N ha<sup>-1</sup> (BERGHETTI, 2020). Apesar de em seus estudos, Berghetti (2020) ter feito o parcelamento da adubação nitrogenada em duas aplicações, na DMET foi aplicado no plantio e 12° mês 77,85 e 135,00 kg N ha<sup>-1</sup> respectivamente. Os valores aplicados no plantio estão acima da DMET observada para o cedro indiano (36,70 kg N ha<sup>-1</sup>) demonstrando baixa resposta da espécie a adubação nitrogenada no plantio.

O aumento da concentração de N no tecido foliar contribui na formação de cloroplastos durante o crescimento foliar (RAZAQ et al., 2017; BERGHETTI et al., 2021), estimula a formação de pigmentos fotossinteticamente ativos (TEIXEIRA FILHO et al., 2011) e aumenta a quantidade de proteínas responsáveis pela fotossíntese (CAMARERO; CARRER; WAY, 2017; TANAKA; KUROKAWA; OIKAWA, 2018).

O incremento dos níveis de N na folha aumenta a alocação de N para a produção de ribulose 1,5 bifosfato carboxilase/oxigenase (Rubisco), elevando a eficiência da carboxilação (ROCHA et al., 2018;) e das taxas de assimilação de CO<sub>2</sub> (GAN et al., 2016; BERGHETTI et al., 2021). Desse modo, plantas de cedro indiano cultivadas com

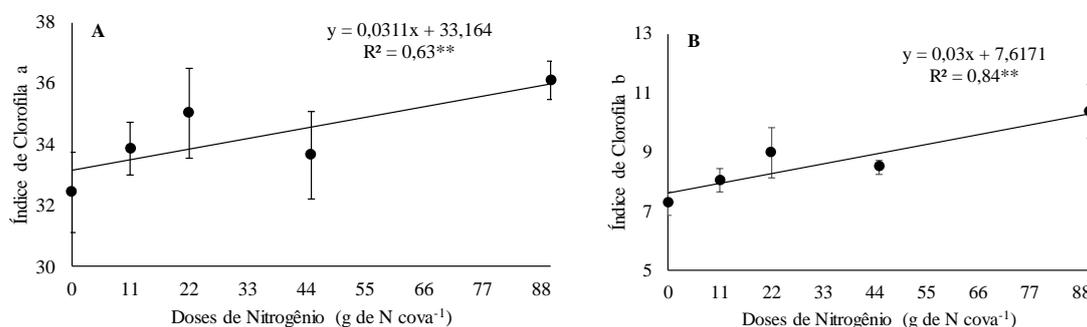
a aplicação de doses baixas de N no solo, tendem a incrementar os níveis de N nas folhas e conseqüentemente das taxas fotossintéticas, não sendo necessária aplicação de doses elevadas de N no plantio.

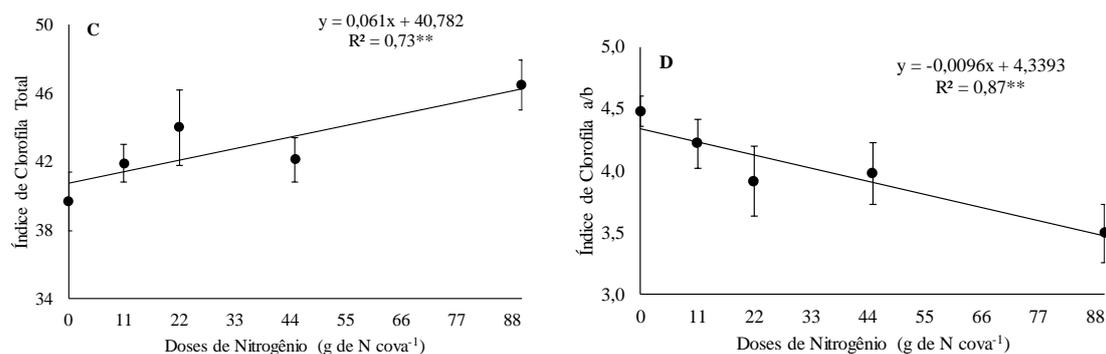
Quando o teor de N no solo se encontra em excesso, a absorção de outros nutrientes como o Ca e Mg podem ser dificultadas, por criar uma espécie de inibição competitiva, ocasionando desbalanço nutricional nas plantas (TAIZ *et al.*, 2021). Este efeito antagônico ocorre pela competição por sítios de ligação das raízes, em que o nutriente mais disponível no solo é absorvido mais rapidamente (TAIZ *et al.*, 2021), desse modo o excesso de N no solo prejudicou a absorção de Ca e Mg nas plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*.

As baixas concentrações de Mg foliar encontradas podem estar relacionadas a relação de Ca: Mg no solo, a qual se encontrava em 2,82: 1, conforme observado por Munguambe, (2018) na proporção de 3:1 essa relação influencia negativamente o crescimento e os teores de Mg das plantas do *Acrocarpus fraxinifolius*. Comparada a outras espécies florestais já mencionadas os teores de Mg encontram-se abaixo da faixa ideal para a maioria dessas espécies.

Aos 180 dias após o transplântio das mudas observou-se incremento de 0,95; 3,20 e 1,45 % para o aumento de cada 11 g de N aplicadas por planta para Índice de Clorofila a, Índice de Clorofila b e Índice de Clorofila total respectivamente (Figura 3 A, B e C), obtendo melhores resposta com a aplicação de 90 g de N no sulco por planta.

Para o Índice de Clorofila a/b observou-se decréscimo com o aumento das doses de N aplicadas, ocorrendo diminuição de 2,43 % para o aumento de cada 11 g de N aplicados por planta no sulco de plantio (Figura 3 D).





**Figura 3.** Índice de clorofila *a* -A, Índice de clorofila *b* -B; Índice de clorofila total -C, Índice de clorofila *a/b* - D em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

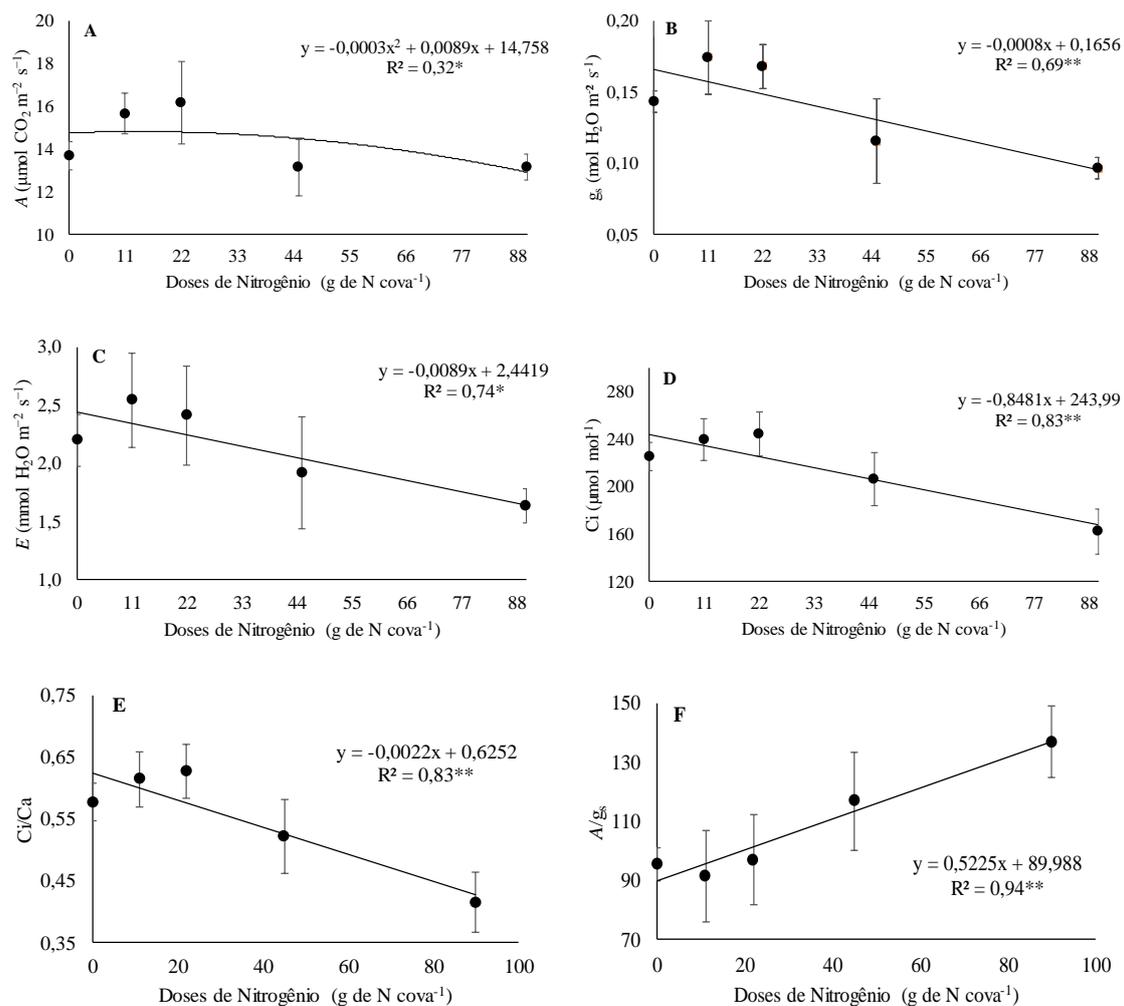
Segundo Berghetti, (2020) os maiores valores de pigmentos nas folhas das plantas cultivadas nos solos com adubação nitrogenada, podem ser atribuídos ao aumento da concentração de N no tecido. Essa resposta é esperada porque, aproximadamente, 60% do N total da folha encontram-se nos cloroplastos, formando parte de enzimas e pigmentos da fotossíntese (BERGHETTI *et al.*, 202).

Para o cedro indiano houve respostas positivas para os índices de clorofila *a*, *b* e totais com o aumento das doses, não sendo possível estabelecer a dose de máxima eficiência técnica (DMET), observando aumentos até a dose de 150 kg N ha<sup>-1</sup>, resultados esses que corroboram com os estudos de Berghetti, (2020) para *Handroanthus heptaphyllus*.

Os parâmetros fisiológicos avaliados responderam a adubação nitrogenada testada. Para a taxa fotossintética (*A*) a dose em proporcionou maiores valores foi a de 11 g de N por planta<sup>-1</sup>, sendo 0,42; 0,07; 1,81 e 11,41% superior as doses 0; 22; 45 e 90 g de N por planta<sup>-1</sup> (Figura 4 A), a equação de melhor ajuste foi a quadrática com ponto de máxima na dose de 15 g de N por planta<sup>-1</sup>, com *A* de 14,82  $\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ .

A condutância estomática (*g<sub>s</sub>*), taxa transpiratória (*E*), concentração interna de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>*), relação entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (*C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>*) responderam negativamente a adubação nitrogenada, enquanto a eficiência intrínseca do uso da água (*A/g<sub>s</sub>*) respondeu positivamente (Figura 4 B, C, D, E e F), as quais se adequaram ao modelo de regressão linear.

Os parâmetros fisiológicos *g<sub>s</sub>*, *E*, *C<sub>i</sub>* e *C<sub>i</sub>/C<sub>a</sub>* apresentaram decréscimo de 5,31; 4,05; 3,82 e 3,87% com o aumento de cada 11 g de N por planta<sup>-1</sup>, respectivamente. *A/g<sub>s</sub>* apresentou aumento de 4,20% para cada 11 g de N aplicados por planta<sup>-1</sup>.



**Figura 4.** Taxa fotossintética (A) –A; Condutância estomática ( $g_s$ ) - B Taxa transpiratória (E) –C; concentração interna de CO<sub>2</sub> (Ci)– D; relação entre a concentração interna e externa de CO<sub>2</sub> (Ci/Ca)-E; Eficiência intrínseca do uso da água (A/ $g_s$ )-F em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Apesar do efeito linear decrescente observado para a maioria das variáveis fisiológicas, a partir dos valores observados pode-se notar que as doses baixas de N aplicadas no solo demonstraram efeito positivo, conforme observado para a taxa fotossintética.

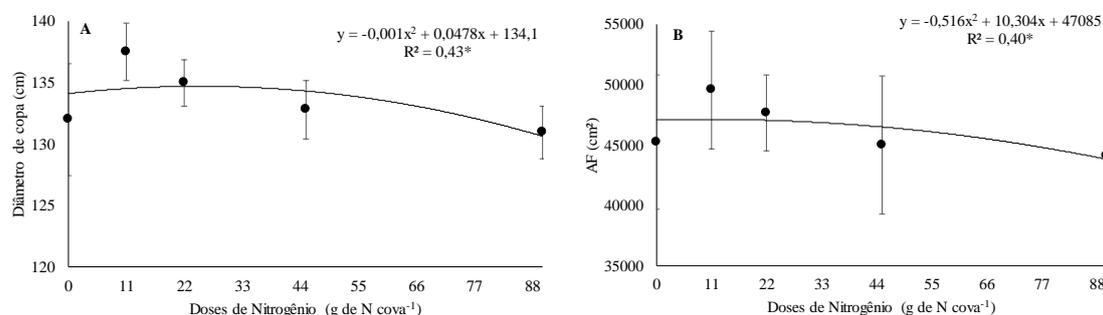
O incremento em aplicações de doses baixas de N para as variáveis fisiológicas pode estar relacionado a classificação botânica da espécie que por ser uma espécie leguminosa da família Fabaceae (ARAÚJO *et al.*, 2021; MUNGUAMBE., 2018; VENTURIN *et al.*, 2014), que apesar de aparentemente não apresentar nódulos fixador

de nitrogênio (HIGA; PRADO, 1998) pode apresentar algum mecanismo radicular que permite o melhor aproveitamento do N mesmo em menor disponibilidade no solo.

Em algumas espécies o excesso de nitrogênio no solo pode ocasionar a deficiência de cobre (BORGES *et al.*, 2021), que está associado a enzimas envolvidas em reações redox, pelas quais ele é reversivelmente oxidado de  $\text{Cu}^+$  a  $\text{Cu}^{2+}$  como a plastocianina, que está envolvida na transferência de elétrons durante as reações dependentes de luz da fotossíntese (TAIZ *et al.*, 2021), assim doses acima de 22 g de N por planta afetam consequentemente a taxa fotossintética das plantas de cedro indiano apresentando menor exigência a adubação nitrogenada de plantio.

Aos 180 dias após transplântio a equação de melhor ajuste para diâmetro de copa e área foliar (AF) foi a quadrática, sendo observado pontos de máximo na dose de 24 e 10 g de N aplicadas por planta, respectivamente (Figura 5 A e B).

Para o diâmetro de copa a aplicação de 22 g de N por planta proporcionou resultados superiores em 3,24 % em relação a dose de 90 g de N por planta, enquanto para a AF observou-se acréscimo de 7,00% da dose de 11 g de N por planta em relação à aplicação de 90 g de N por planta, demonstrando melhores respostas morfológicas da espécie com aplicação de doses baixas de N na adubação de plantio.



**Figura 5.** Diâmetro de copa- A; Área Foliar-B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplântio em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média (n = 4)  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

O diâmetro ao nível do solo (DNS) aos 90 e 120 dias após o transplântio em resposta a doses de N aplicadas no plantio adequou-se ao modelo de equação linear decrescente com reduções de 0,66 e 1,68 %, respectivamente para o aumento de cada 11 g de N aplicadas no solo por planta.

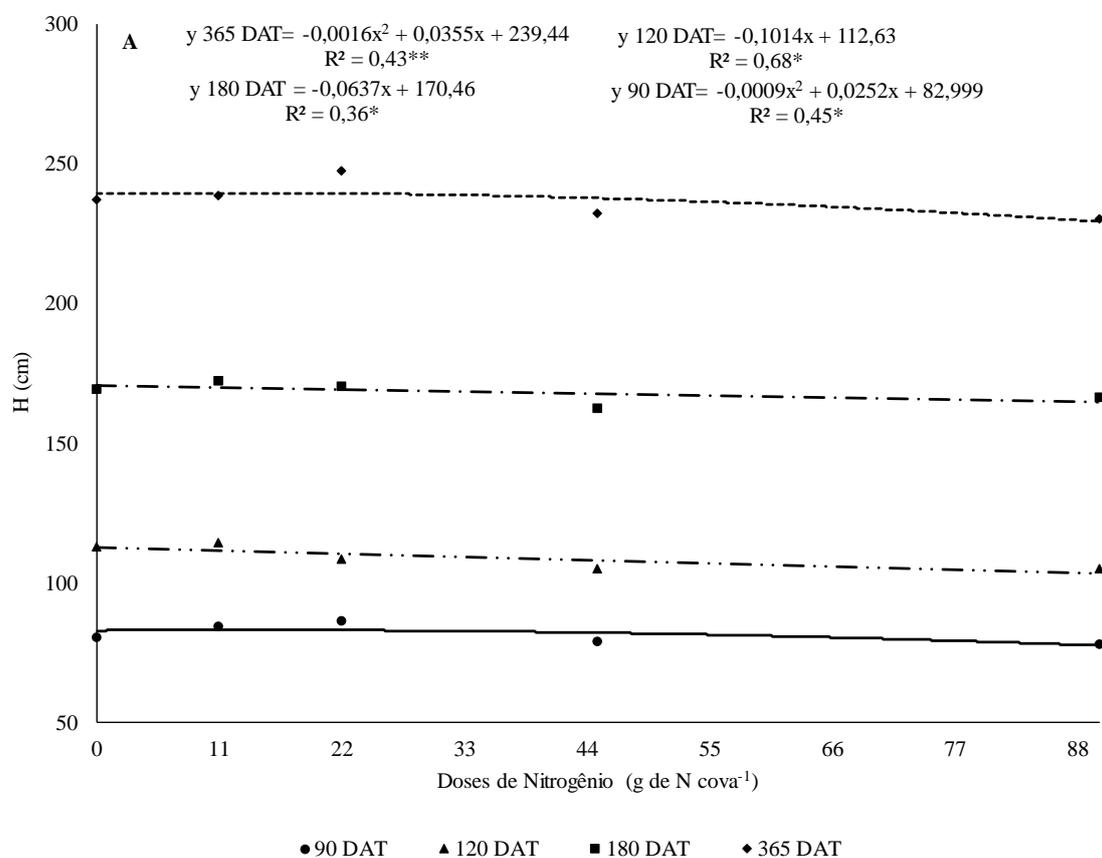
A altura da parte aérea (H) adequou-se ao modelo de equação linear decrescente aos 120 dias após transplântio com redução de 1,00 % para o aumento de cada 11 g de

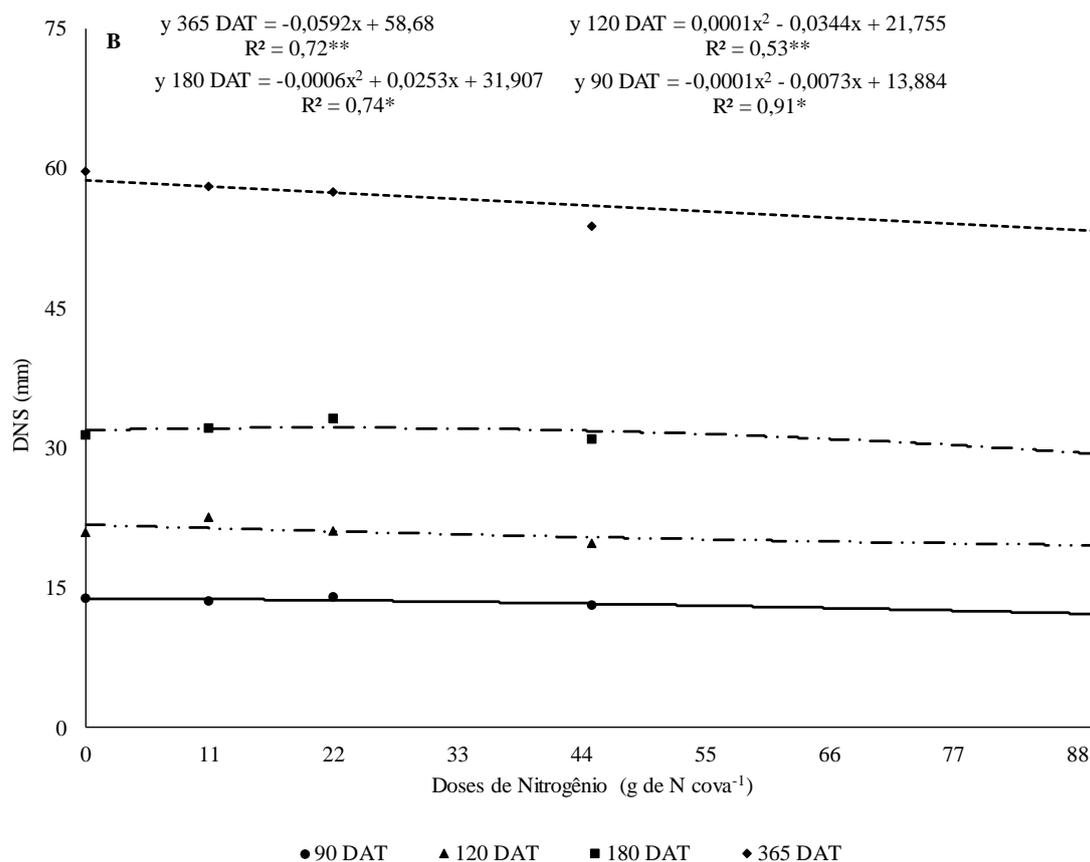
N aplicadas no solo por planta, enquanto aos 90 dias a equação de melhor ajuste foi a quadrática com DMET na dose de 14 g de N por planta aplicado no plantio (Figura 6 A).

O decréscimo com o aumento de cada 11 g de N aplicadas por planta aos 180 dias após transplantio para H foi de 0,41 %. Para o DNS aos 180 dias após o transplantio de acordo com equação quadrática, observou-se DMET na dose de 32,14 g de N aplicadas por planta (Figura 6 B).

Aos 365 dias após o transplantio das mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foram observadas respostas para as variáveis H, DNS, DAP e Vc. Para H (Figura 6 A) DAP e Vc (Figura 7 A e B) houve resposta quadrática à adubação nitrogenada, enquanto para o DNS houve resposta linear decrescente com o aumento das doses.

Melhores respostas para a H foram observadas na dose de 11 g de N por planta, proporcionando H de 239,64 cm sendo 0,08; 0,08; 0,77 e 4,16 % superior em relação as doses de 0, 22, 45 e 90 g de N, respectivamente. Para o DNS foi observado decréscimo de 1,11 % para o aumento de cada 11 g de N aplicados por planta. A dose de 0 g de N proporcionou resultados superiores para DNS, sendo 1,11; 2,22; 4,54 e 9,08 % superior em relação as doses de 11, 22, 45 e 90 g de N por planta.





**Figura 6.** Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro ao nível do solo (DNS) -B; em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 90, 120, 180 e 365 dias após o transplante (DAT) em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Berghetti *et al.* (2021) avaliando atributos morfológicos e fisiológicos com o uso de doses de N em plantas de *heptaphyllus* observou que a aplicação de doses crescentes de N no solo não alterou o DNS das plantas aos 6 e 12 meses após a aplicação, contrariando os resultados do presente estudo.

O melhor crescimento e desenvolvimento do cedro australiano observado aos 180 dias após o plantio, foi obtido quando aplicou as doses de  $45 \text{ kg ha}^{-1} \text{ N}$ ,  $135 \text{ kg ha}^{-1} \text{ P}_2\text{O}_5$  e  $67,5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ K}_2\text{O}$  aplicados no plantio em espaçamento  $2,0 \text{ m} \times 2,0 \text{ m}$  de acordo com Oliveira *et al.* (2016). Em plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplante não foram observados efeitos positivos no crescimento, os quais foram observados somente nas avaliações no primeiro ano após plantio.

Avaliando a utilização de diferentes doses de nitrogênio Viçosi *et al.* (2019) verificaram que não houve influência no crescimento inicial da uvaia, obtendo-se resultado não significativo para H e DNS aos 30 dias após transplante.

Para o camu-camu, doses acima de 320 kg. ha<sup>-1</sup> prejudicam o desenvolvimento inicial e formação das mudas dessa cultura (SANTOS *et al.*, 2012), enquanto para a pitangueira (*Eugenia uniflora*) recomenda-se iniciar a adubação após o segundo mês, quando se observa incremento tanto em altura como em diâmetro do colo em resposta à adubação nitrogenada (DALANHOL *et al.*, 2012).

Em argissolo vermelho Berghetti (2020) observou maiores valores em H (178,2 cm) na dose de máxima eficiência técnica (DMET) de 257,5 kg N ha<sup>-1</sup> parceladas em duas aplicações aos 18 meses de idade, com crescimento de 4,2 vezes superior ao tratamento controle para ipê-roxo, enquanto para o cedro indiano maiores valores para H (239,64 cm) foram observados na DMET de 11 g por planta<sup>-1</sup> (18 kg N ha<sup>-1</sup>).

Aos 18 meses após a aplicação de N plantas de ipê-roxo apresentaram os maiores valores de DNS (33,9 mm) na DMET de 263,5 kg N ha<sup>-1</sup> de forma parcelada (BERGHETTI, 2020), contrariando aos resultados obtidos para *Acrocarpus fraxinifolius* em que se observou que doses crescentes de N proporcionaram reduções no DNS.

Munguambe, (2018) observaram resposta quadrática em função das doses de N aplicadas na forma de ureia para H, alcançando o seu valor máximo na dose de 95 g por planta de N, atingindo H de 7,22 m foi verificado para o período entre seis e 24 meses após o plantio no campo. Devido o autor ter parcelado a adubação nitrogenada em três aplicações foi aplicado no plantio a dosagem de 31,80 g de N por planta, dosagem esta superior a DMET encontrada no primeiro ano no presente estudo (11 g de N por planta).

Sousa, (2016) encontrou efeitos de ordem quadrática para o crescimento em altura de *Dipteryx alata*, sendo a dose estimada para obter a maior altura de planta (40,41 cm) de 31,64 g planta<sup>-1</sup> de N.

Resultados encontrados por Carlos (2013) mostram efeito quadrático das doses de N, no DNS de *Dalbergia nigra*, estimando que o maior DNS foi encontrado aos seis meses foi para a dose 88,34 g de por planta de N e, aos 12 meses, para a dose 121 g por planta de N. Sousa (2016), estudando o crescimento de *Dipteryx alata* em resposta a adubação nitrogenada aos 12 meses de idade, encontrou efeitos de ordem quadrática para o DNS.

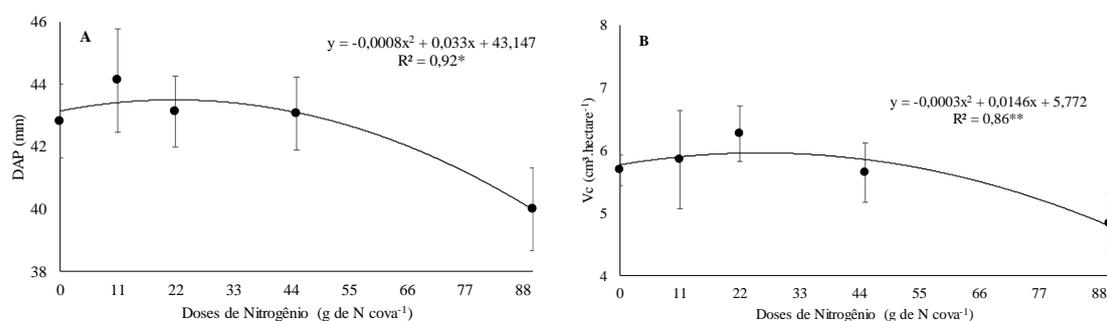
Apesar da pequena resposta à adubação nitrogenada nas espécies florestais, Jesus *et al.* (2012) ressaltam a importância, não apenas diretamente no aumento do crescimento nos estágios iniciais de implantação dos povoamentos, mas, também na contribuição da ciclagem do nutriente via mineralização da serrapilheira, manutenção da

matéria orgânica no solo, redução da degradação do solo e do aumento das sequências de plantios na mesma área.

Em cultivos de eucalipto destaca-se que o potencial de resposta à aplicação de N está relacionado os teores de N total e mineralizável do solo (PULITO, 2009), ocorrendo resposta à adubação em povoamento de clones até dois anos de idade, mesmo em solos com alto teor de matéria orgânica (GAVA *et al.*, 2003). Os autores destacam que a absorção de N pelas plantas está associada à disponibilidade na forma mineral no solo, resultante do processo da mineralização da matéria orgânica nos primeiros anos de implantação, acrescido da mineralização da serrapilheira em povoamentos estáveis.

O DAP em resposta a adubação nitrogenada adequou-se ao modelo de regressão quadrática com maior valor na dose de 22 g de N por planta observando DAP de 43,49 mm, sendo 0,78; 0,17; 1,09 e 8,85 % superior em relação as doses 0, 11, 45 e 90 g de N por planta, respectivamente (Figura 7 A).

Segundo equação de regressão o maior Vc em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi na dose de 24,30 g de N por planta, observando o volume de madeira de 5,95 m<sup>3</sup> por hectare (Figura 7 B). A dose de 22 g de N proporcionou incremento de 2,96; 0,87; 2,13 e 21,72% no volume de madeira em relação as doses de 0, 11, 45 e 90 g de N, respectivamente.



**Figura 7.** Diâmetro na altura do peito (DAP) – A; Volume cilíndrico com casca (Vc) -B em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 365 dias após o transplantio em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média (n = 4) ± EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Na ausência de nitrogênio, ocorre redução da altura de plantas, diâmetro de copa e DAP (DA ROS *et al.*, 2016), corroborando com os resultados obtidos. Os maiores valores de H, DAP e Vc nas plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* observados com o aumento das doses de N pode ser atribuído ao aumento da disponibilidade de formas de

N mineral no solo potencializando a absorção pelo sistema radicular, sendo favorecidos em pequenas dosagens do nutriente aplicadas no sulco no plantio.

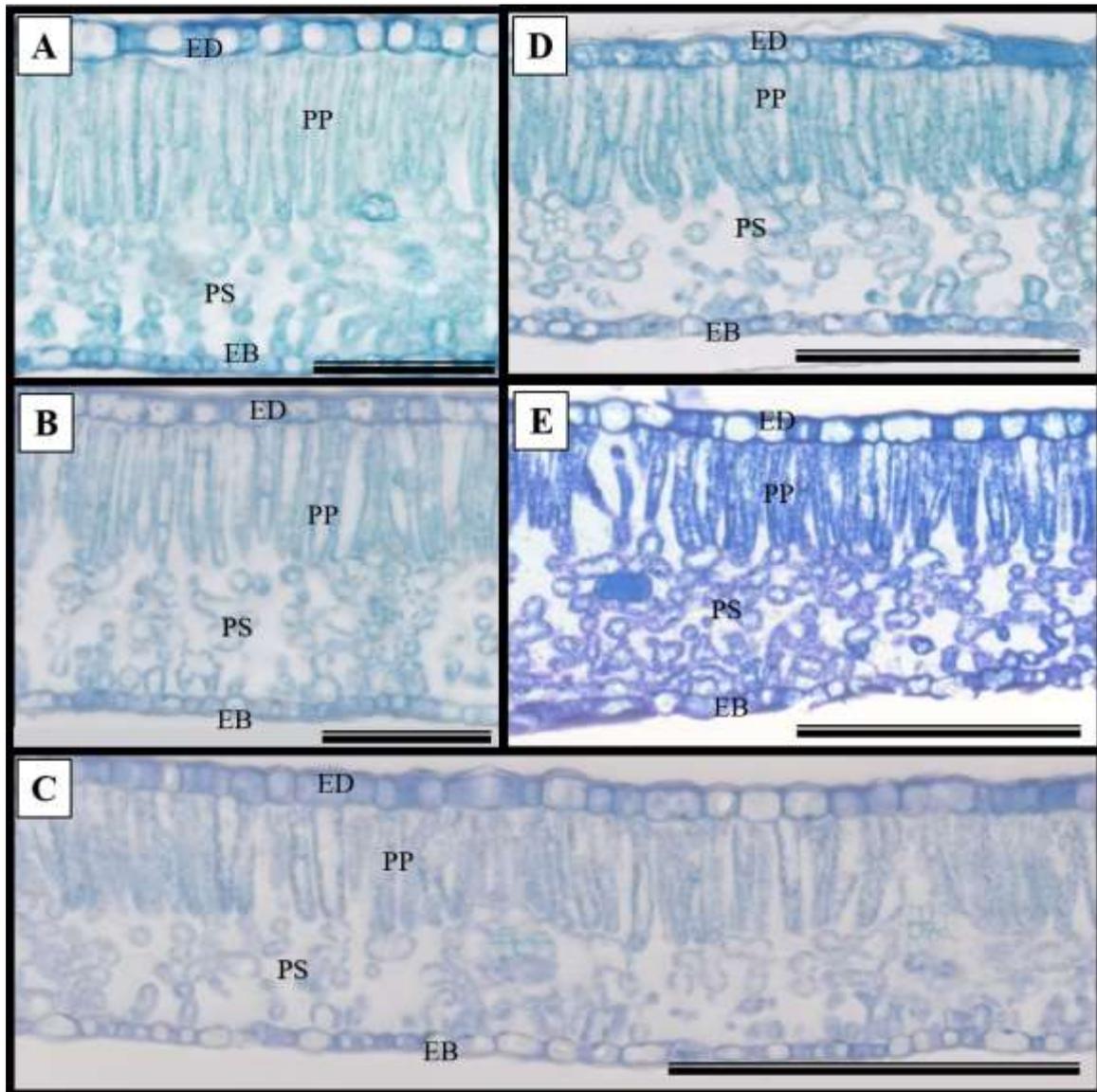
O N é absorvido pelas raízes principalmente nas formas de amônio (N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) (ZHANG *et al.*, 2018), sendo que parte desse nutriente é transportado via xilema para a parte aérea e acumulado em órgãos, como as folhas (JORDAN *et al.*, 2014). Desse modo, os processos metabólicos são favorecidos pela maior presença de N e, conseqüentemente, ocorre o acúmulo de biomassa para crescimento das plantas (BERGHETTI *et al.*, 2021).

Em média, o incremento na produtividade de madeira não ultrapassa a 12% em povoamentos jovens (1 a 2,2 anos) e 6% em intermediários (3 a 4 anos) (DA ROS *et al.*, 2016), conforme observado no presente estudo em que foram observados acréscimos de 2,96% da DMET em relação ao tratamento com ausência de adubação.

O efeito da adubação nitrogenada é menos expressivo logo após o plantio, provavelmente, pela menor exploração do solo pelo sistema radicular das plantas nos primeiros meses de plantio (BERGHETTI *et al.*, 2021). No entanto, aos 12 meses após o transplante a espécie respondeu positivamente aos parâmetros morfológicos com o aumento das doses de N aplicadas no solo, sendo os maiores valores de H, DAP e Vc observados nas DMET de 18,40; 34,40 e 40,50 kg N ha<sup>-1</sup>, respectivamente.

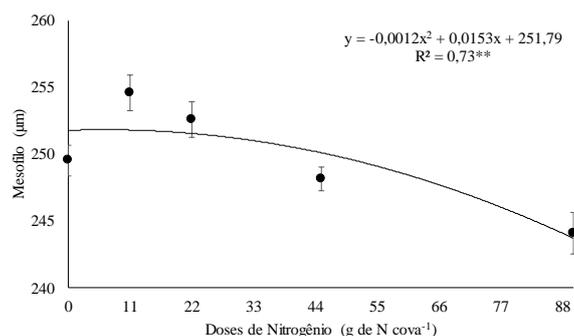
A espécie *Acrocarpus fraxinifolius* apresenta uma epiderme foliar nas faces adaxial e abaxial, constituída por células isodiamétricas com paredes anticlinais planas ou ligeiramente convexas e folhas anfiestomáticas. O mesofilo é dorsiventral, composto de uma camada de células paliçadas, parênquima esponjoso é composto com quatro a cinco células

O cultivo de *Acrocarpus fraxinifolius* nas diferentes doses de nitrogênio ocasionaram expansão das células parenquimáticas com maior espessura do mesofilo nas doses de 11; 22 e 45 g de N por planta, enquanto na dose de 90 g de N por planta observou-se menor espessura do mesofilo e aumento de espaços intracelulares quando comparada a dose de 0 g de N por planta (Figura 8 A, B, C, D e E).



**Figura 8.** Anatomia das folhas de *Acrocarpus fraxinifolius* 180 dias após o transplântio em resposta a adubação nitrogenada, sendo (A) 0 g de N por planta, (B) 11 g de N por planta, (C) 22 g de N por planta, (D) 45 g de N por planta e (E) 90 g de N por planta. (ED) epiderme adaxial. (EB) epiderme abaxial. (PP) parênquima paliçádico. (SP) parênquima esponjoso. (A-E). Barra de escala de 100  $\mu\text{m}$ .

Segundo equação de regressão quadrática conforme figura 9, a maior espessura do mesofilo foliar em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foi encontrada na dose de 6,40 g de N por planta, observando-se a espessura de 251,84  $\mu\text{m}$ . A dose de 11 g de N por planta proporcionou incremento de 3,32 % na em relação as doses de 90 g de N por planta demonstrando que doses elevadas de N não favorecem o crescimento e desenvolvimento da espécie, afetando parâmetros anatômicos.



**Figura 9.** Espessura do mesofilo foliar em *Acrocarpus fraxinifolius* aos 180 dias após o transplante em resposta a adubação nitrogenada. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

O mesofilo da folha possui dois tipos de tecidos fundamentais: o parênquima paliçádico, de células alongadas, e o parênquima esponjoso, com células de formato irregular, com sua trajetória da folha para a atmosfera, a água é puxada do xilema para as paredes celulares do mesofilo, evaporando para os espaços intercelulares (TAIZ *et al.*, 2021).

O parênquima esponjoso apresenta grandes espaços de ar entre as células, que não são cimentadas em toda sua periferia pela lamela média, permitindo a troca de gases ( $\text{CO}_2$ ) pelos espaços intercelulares da folha durante a fotossíntese e a respiração (TAIZ *et al.*, 2021), assim, o aumento do mesofilo nas plantas de cedro indiano foi acompanhado da taxa fotossintética com melhores médias na dose de 22 g de N por planta aplicadas no plantio.

#### 4. CONCLUSÃO

A adição de nitrogênio no solo elevou a concentração de nitrogênio nas folhas, aumentando os índices de clorofila e consequentemente a absorção de energia luminosa. O aumento da disponibilidade de nitrogênio no solo proporcionou maior taxa fotossintética e crescimento nas plantas de *Acrocarpus fraxinifolius*, com consequente incremento no volume de madeira produzido no primeiro ano, sendo a dose de 22 g N ( $37 \text{ kg. ha}^{-1}$ ) aplicado no sulco de plantio por planta indicada para implantação de povoamentos com a espécie nas condições estudadas.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, C. A. et al. **Köppen's climate classification map for Brazil.** Meteorologisch Zeitschrift, v. 22, n. 6, p. 711- 728, 2014.

ARAÚJO, Geislaine do Carmo Reis et al. Initial Development of *Acrocarpus fraxinifolius* in Function of Soil Preparation and Phosphate Mineral Fertilization. **Floresta e Ambiente**, v. 29, p. e20210082, 2021.

BARBOSA, Gabriela Paranhos et al. Crescimento inicial de espécies florestais para fins de uso múltiplo na região central de Minas Gerais. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 3, p. 25256-25274, 2021.

BARROS OLIVEIRA, Carolina A. et al. Characterization of *Acrocarpus fraxinifolius* wood submitted to heat treatment. **Maderas. Ciencia y tecnología**, v. 24, 2022.

BDMET-INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa. Instituto Nacional de Meteorologia. Temperaturas máximas e mínimas e umidade relativa do ar anos 2013/2015. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/>. Acesso em: 12 jun,2022.

BELLOTTE, JOÃO LEONARDO MIRANDA. **Dinâmica nutricional em função da adubação suplementar em povoamentos de eucalipto no cerrado do estado do Mato Grosso do Sul.** 2020.

BENEDETTI, Vanderlei. **Nutrição e fertilização florestal [prefácio].** Piracicaba: IPEF., 2015.

BERGHETTI, ÁLVARO LUÍS PASQUETTI. **Uso da adubação nitrogenada, fosfatada e potássica em plantios de *Handroanthus heptaphyllus*: Uma abordagem silvicultural e fisiológica.** 125 p., 2020.

BERGHETTI, Álvaro Luís Pasquetti et al. Effects of nitrogen fertilization on the growth and on photochemical efficiency in plants of *Handroanthus heptaphyllus*. **Journal of Plant Nutrition**, v. 44, n. 16, p. 2464-2475, 2021.

Borges, A. L., Girardi, E. A., Souza, L. D. S., Luciano, D. S. S. (2021). **Calagem e adubação para os citros (laranjeiras, limeiras-ácidas e tangerineiras).**

Bueno, A., L. Greenfield, K. Pritsch, S. Schmidt, and J. Simon. 2019. Responses to competition for nitrogen between subtropical native tree seedlings and exotic grasses are species-specific and mediated by soil N availability. **Tree Physiology** 39 (3):404–13. doi: 10.1093/treephys/tpy096.

CAMARERO, J. J.; CARRER, M.; WAY, D. Bridging long-term wood functioning and nitrogen deposition to better understand changes in tree growth and forest productivity. **Tree Physiology**, Oxford, v. 37, n. 1, p. 1–3, 2017.

CARLOS, L.; **Crescimento inicial de *Dalbergia nigra* sob calagem e adubação com N, P e K em condições controladas e em campo.** 2013. 113 f.

CQFS-RS/SC. **Manual de calagem e adubação para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 11.ed. Porto Alegre: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo/Núcleo Regional Sul, 2016. 376 p.

Davide AC, Silva EAA. **Produção de sementes e mudas de espécies florestais**. Lavras: Ufla 2008.

DALANHOL, S.J., KRATZ, D., NOGUEIRA, A.C.,GAIAD, S., 2012.**Efeito da adubação no crescimento de mudas de *Eugenia uniflora* L**. In: FERTBIO, 2012, Maceió-AL. Anais... Viçosa-MG: SBCS, 2012. 3 p.

DA ROS, Clovis Orlando et al. **Crescimento inicial de povoamentos mistos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden e *Toona ciliata* M. Roem var. australis com supressão de macronutrientes primários**. 2016.

DA SILVA, Fábio Cesar et al. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2009., 2009.

DA SILVA MORETTI, B. et al. Growth and mineral nutrition in seedlings of australian cedar (*Toona ciliata*) subjected to nutrient deprivation. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 4, p. 453–464, 2015.

DE OLIVEIRA, M.R.R et al. Physical-mechanical properties of panels produced with corn cob particles and different types and contents of adhesives. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 11, p. e541101119828-e541101119828, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Cultivo do Eucalipto: sistema de produção**, 4. 2. ed. [S. 1.], 2010.

FIRMINO, A. C.; MORAES, W. B.; FURTADO, E. L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathol**, Botucatu, v. 41, n. 2, p. 160, 2015.

GAN, H. et al. Phosphorus and nitrogen physiology of two contrasting poplar genotypes when exposed to phosphorus and/or nitrogen starvation. **Tree Physiology**, Oxford,v. 36, n. 1, p. 22– 38, 2016.

GAVA, J. L.; ARAÚJO, E. F.; SILVEIRA, R. L. V. A. Crescimento de clones de *Eucalyptus* em resposta à aplicação de nitrogênio em solos com alto teor de matéria orgânica. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: SBCS, 2003. p. 1-3.

GONÇALVES, J. L. M. et al. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fast-growing eucalypt plantations: The Brazilian experience. **Southern Forests**, Pretoria, v. 70, n. 2, p. 105–118, 2008.

GONÇALVES, J. L. DE M. et al. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v. 301, p. 6–27, 2013.

HIGA, A. R.; PRADO, C. A. *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. In: GALVÃO, A. P. M. (Coord.). **Espécies não tradicionais para plantios com finalidades produtivas e ambientais**. Colombo: Embrapa Florestas, 1998. p. 57-60. Seminário realizado em Curitiba, de 6 a 8 de outubro de 1998.

JESUS, Guilherme Luiz de et al. Doses e fontes de nitrogênio na produtividade do eucalypto nas frações da matéria orgânica em solo da região do cerrado de Minas Gerais. **Rev. Bras Ciênc. Solo**, Viçosa, v. 36, n. 1, p. 201-214, Feb. 2012.

JORDAN, M. O. et al. The early spring N uptake of young peach trees (*Prunus persica*) is affected by past and current fertilizations and levels of C and N stores. **Tree Physiology**, Oxford, v. 34, n.1, p. 61-72 2014.

LI, Y., N. HE, J. HOU, L. XU, C. LIU, J. ZHANG, Q. WANG, X. ZHANG, AND X. WU. 2018. Factors influencing leaf chlorophyll content in natural forests at the biome scale. **Frontiers in Ecology and Evolution** 6:1–10. doi: 10.3389/fevo.2018.00064.

LIMA, G. S. **Deficiência hídrica em plantas de pimentão (*Capsicum annuum* L) fertirrigadas e seus efeitos sobre a produção de massa e parâmetros bioquímicos**. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Agronomia). Faculdade de Ciência Agrônomicas. Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho. Botucatu, 2013.

LINCOLN TAIZ, EDUARDO ZEIGER, IAN MAX MØLLER, ANGUS MURPHY, **Fundamentos de Fisiologia Vegetal** - 6. ed. N.p., Artmed Editora, 2021.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006.

MARSCHNER, P. A - Marschner 's Mineral Nutrition of Higher Plants Third Edition. **Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants**, v. 3 rd Ed, p. 651, 2012.

MARTÍNEZ PE, GARCÍA JMM, SÁNCHEZ LH, PÉREZ GO. **Cultivo intercalado de cedro rosado y su efecto sobre el contenido de materia orgánica en suelo**. Revista UDO Agrícola 2006; 6 (1): 109-113.

MELO, E. A. S. C. DE et al. Responses of clonal eucalypt plantations to N, P and K fertilizer application in different edaphoclimatic conditions. **Forests**, v. 7, n. 1, p. 1–15, 2016.

MUNGUAMBE, J.F. **Mineral nutrition of *Acrocarpus fraxinifolius* Wight & Arn. grown in greenhouse and under field fertilization**/ João Faustino Munguambe - 2018. 131 p.: il.

OLIVEIRA, J. R. et al. **Crescimento e desenvolvimento do cedro australiano em diferentes doses de nitrogênio, fósforo e potássio**. 2016.

PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; SITPP, S. R. **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes. Piracicaba: IPNI, 2014. v. 3, 467 p.**

PULITO, A. P. **Resposta à fertilização nitrogenada e estoque de nitrogênio biodisponível em solos usados para plantações de *Eucalyptus*.** 2009. 59 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

RAI SN. Pre-treatment of *Acrocarpus fraxinifolius* seeds. **Indian-Forester** 1976; 102(80):488 491.

RAZAQ, M. et al. Influence of nitrogen and phosphorous on the growth and root morphology of Acer mono. **PloS one**, v. 12, n. 2, p. e0171321–e0171321, 2017.

ROCHA, J. S. et al. Nitrogen supplementation improves the high-light acclimation of *Guazuma ulmifolia* Lam. seedlings. **Trees**, v.33, p. 421-431, 2018.

SANTOS, V.A., CHAGAS, E.A., VILENA, J.O., LOZANO, R.M.B., Ribeiro, I.G., Albuquerque, R.C.S., 2012. **Adubação nitrogenada na formação de mudas de camu-camu.** In: 1º Simpósio Internacional de Botânica Aplicada e 1º Simpósio Nacional de Frutíferas do Norte e Nordeste, 2012, Lavras-MG. Anais... Lavras-MG: CPAF, 2012. p. 10.

SANTOS, H. G. **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 3.ed. Rio de Janeiro EMBRAPA Solos, 2013. 353 p.

SANTOS, Victor Galvão dos. **Aproveitamento da água residual da termorreificação do cedro indiano e avaliação do potencial de aplicação como biofertilizante.** 2023.

SILVA, F. C. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes.** 2. ed. Brasília DF, Embrapa Informação Tecnológica, 2009, 627p.

SOUSA, F.F. **Aspectos nutricionais do baru (*Dipteryx alata* Vog.) em casa de vegetação e em campo.** 2016. 145p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2016.

TANAKA, T.; KUROKAWA, C.; OIKAWA, S. Leaf shedding increases the photosynthetic rate of the canopy in N<sub>2</sub>-fixing and non-N<sub>2</sub>-fixing woody species. **Tree Physiology**, Oxford, v. 38, n. 12, p. 1903–1911, 2018.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal.** Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAIZ, Lincoln et al. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal-6.** Artmed Editora, 2021.

TEIXEIRA FILHO, M. C. M. et al. Application times, sources and doses of nitrogen on wheat cultivars under no till in the Cerrado region. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 41, n. 8, p. 1375–1382, 2011.

THEBALDI MS, LIMA LA, COLARES MFB, SILVA AC, LIMA PLT. Dinâmica das propriedades de um substrato florestal exposto à irrigação. **Ciência Florestal** 2015; 25 (2): 375-384. 10.5902 / 1980509818456

TOCA, A., J. A. OLIET, P. VILLAR-SALVADOR, J. MAROTO, AND D. F. JACOBS. 2018. Species ecology determines the role of nitrogen nutrition in the frost tolerance of pine seedlings. **Tree Physiology** 38 (1):96–108. doi: 10.1093/treephys/tpx165.

TRIANOSKI, R.; IWAKIRI, S.; MATOS, J. L. M de; PRATA, J. G. Viabilidade da utilização de *Acrocarpus fraxinifolius* em diferentes proporções com *Pinus* spp. para produção de painéis aglomerados. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 343-350, setembro, 2011.

VENTURIN, N.; CARLOS, L. SOUZA, P. A. de; MACEDO, R. L. G.; VENTURIN, R. P. HIGASHIKAWA, E. M. **Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades.** Cerne Lavras, vol.20 n. 4, oct- dec. 2014.

VIÇOSI, Karen Andreon et al. Adubação nitrogenada no desenvolvimento inicial de uvaia. **REVISTA DE AGRICULTURA NEOTROPICAL**, v. 6, n. 1, p. 82-86, 2019.

ZHANG, C. et al. Transcriptomic insight into nitrogen uptake and metabolism of *Populus simonii* in response to drought and low nitrogen stresses. **Tree Physiology**, Oxford, v. 38, n. 11, p. 1672–1684, 2018.

### CAPÍTULO III

EFEITO DA ADUBAÇÃO DE RUSTIFICAÇÃO EM MUDAS DE *Acrocarpus fraxinifolius* SUBMETIDAS À RESTRIÇÃO HÍDRICA

## RESUMO

Entre os efeitos causados pela deficiência hídrica nas espécies florestais estão a redução do crescimento, associada a menor área foliar, baixa produção de matéria seca e redução da parte aérea. Com o intuito de aumentar a resistência das mudas às condições adversas como a disponibilidade hídrica no solo, a adubação de rustificação pode ser utilizada antes do plantio no campo. Diante disso, objetivou-se avaliar o uso da adubação de rustificação nos parâmetros morfológicos e fisiológicos do cedro indiano em diferentes conteúdos de água no solo. O experimento foi instalado em delineamento em blocos ao acaso (DBC) em esquema fatorial 2x5, sendo testadas duas adubações de rustificação (parcial e completa) e cinco reposições hídricas (30; 40; 50; 60 e 70 % da capacidade de campo “CC”) com quatro repetições. As variáveis de trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a*, índices de clorofila, potencial hídrico foliar, taxa de liberação de eletrólitos e parâmetros morfológicos foram avaliados com trinta dias (30) dias após a aplicação (DAA) das capacidades de campo testadas. De modo geral, foram observados em condições de déficit hídrico no solo, diminuição da taxa fotossintética, condutância estomática, transpiração, potencial hídrico foliar, rendimento quântico potencial do fotossistema II, rendimento quântico efetivo do fotossistema II, coeficiente de dissipação fotoquímica produção e biomassa da parte aérea e radicular. Em mudas submetidas a menor disponibilidade hídrica observou-se menor tolerância morfofisiológica ao estresse, com menor estabilidade das membranas causando reduções na produção de biomassa. As plantas cultivadas com adubação de rustificação completa proporcionaram maior estabelecimento pós-plantio, com incremento na eficiência do uso da água, taxa fotossintética, índices de clorofila e produção de biomassa. Assim, o uso da adubação de rustificação em plantas de cedro indiano pode ser utilizado a fim de evitar efeitos da baixa disponibilidade hídrica no solo.

**Palavras-chave:** eficiência do uso da água; espécies florestais; estresse; mudas; tolerância.

## ABSTRACT

Among the effects caused by water deficiency in forest species are reduced growth, associated with smaller leaf area, low dry matter production and reduction in aerial parts. To increase the resistance of seedlings to adverse conditions such as water availability in the soil, rustification fertilizer can be used before planting in the field. Therefore, the objective was to evaluate the rustification fertilization use on the morphological and physiological parameters of Indian cedar with different water contents on soil. The experiment was carried out in a randomized block design (DBC) in a 2x5 factorial scheme, testing two rustification fertilizations (partial and complete) and five water replacements (30; 40; 50; 60 and 70% of the field capacity "CC ") with four repetitions. The variables of gas exchange, chlorophyll a fluorescence, chlorophyll indices, leaf water potential, electrolyte release rate and morphological parameters were evaluated thirty days (30) days after application (DAA) of the tested field capacities. In general, under conditions of water deficit in the soil, a decrease in photosynthetic rate, stomatal conductance, transpiration, leaf water potential, potential quantum yield of photosystem II, effective quantum yield of photosystem II, photochemical dissipation coefficient, production and biomass of aerial and root parts were observed. In seedlings subjected to lower water availability, lower morphophysiological tolerance to stress was observed, with lower membrane stability causing reductions in biomass production. Plants grown with complete hardening fertilization provided greater post-planting establishment, with an increase in water use efficiency, photosynthetic rate, chlorophyll indices and biomass production. Thus, the rustification fertilizers use on Indian cedar plants can be used to avoid the effects of low water availability in the soil.

**Keywords:** water use efficiency; forest species; stress; seedlings; tolerance.

## 1. INTRODUÇÃO

O metabolismo primário e secundário de espécies florestais é influenciado pela disponibilidade hídrica (STAPE *et al.*, 2010; QUEIROZ *et al.*, 2017). A deficiência hídrica é a principal causa de estresse abiótico em culturas agrícolas e florestais, sem um único mecanismo relacionados à tolerância à seca; que envolve, por exemplo, processos fisiológicos complexos, interações bioquímicas e anatômicas das plantas (MATOS *et al.*, 2014; MARTINS *et al.*, 2018; NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2020).

O estresse hídrico altera o metabolismo primário, causando fechamento estomático com diminuição da assimilação de CO<sub>2</sub> ocasionando a redução da taxa fotossintética (NÓIA JÚNIOR *et al.*, 2020; RIPOLL *et al.*, 2016), podendo resultar em aumento significativo de espécies reativas de oxigênio (EROS) (MITTLER, 2017), afetando negativamente o crescimento da planta, desenvolvimento e produtividade, especialmente em regiões áridas e semiáridas (PULAVARTY *et al.*, 2016; SUZUKI & KATANO, 2018).

De acordo com Sá *et al.* (2023) o estresse hídrico induz alterações no metabolismo vegetal, dependendo da espécie, genótipo, duração e severidade da condição, assim quando a planta está em ambiente que apresenta limitação hídrica, ocorrem várias alterações fisiológicas, como o fechamento estomático, diminuição da fotossíntese, aumento da temperatura foliar, de modo a adaptar-se a condição estressante (TAIZ *et al.*, 2017).

Entre os efeitos causados pela deficiência hídrica nas espécies florestais estão a redução do crescimento, associada a menor área foliar, baixa produção de matéria seca, redução da parte aérea e aumento da abscisão foliar (KUROMORI; SEO; SHINOZAKI, 2018).

Segundo Benedetti, (2015) quando as mudas já estiverem formadas, portanto, prontas para serem plantadas no campo, recomenda-se, antes do transplante, realizar a "rustificação" com o intuito de aumentar a resistência das mudas às condições adversas como a disponibilidade hídrica no solo.

Na fase de "rustificação", que dura de 15 a 30 dias, reduzem-se as regas e suspendem-se as adubações de cobertura, principalmente a nitrogenada favorecendo o engrossamento do caule (BENEDETTI, 2015). Com o objetivo de acelerar o crescimento inicial das mudas no campo, recomenda-se a adubação de expedição antes

de sair do viveiro (HIGASHI; DE ARRUDA SILVEIRA 2004), porém poucos estudos avaliam o efeito das adubações de rustificação após o transplântio.

O *Acrocarpus fraxinifolius* é uma espécie arbórea de porte alto da família das Fabaceas, utilizada como árvore de sombra em plantações de café, bem como para produção de madeira e/ou enriquecimento florestal (ARAÚJO *et al.*, 2021), produz madeira dura, utilizada, por exemplo, na fabricação de móveis finos, aplicação em edificações para acabamento de interiores, fabricação de instrumentos musicais e caixas para embalagens (FIRMINO *et al.*, 2015), apresentando importância agrícola e ambiental.

Melhor desempenho silvicultural para a espécie tem sido observado solos profundos, argilosos e bem drenados, com pH de 5 a 7 (VENTURIN *et al.*, 2014). A demanda por produtos florestais de base madeireira tem levado a busca constante por novas espécies e técnicas silviculturais, com o objetivo de aumentar a produtividade dos plantios florestais (ARAÚJO *et al.*, 2021).

Considerando o potencial do cedro indiano na indústria florestal e o seu potencial e expansão de cultivo, nota-se a necessidade de estudos que busquem avaliar os reais efeitos do estresse hídrico no desenvolvimento de mudas dessa espécie, uma vez que já foi demonstrado para espécies florestais redução em variáveis morfológicas e fisiológicas sob efeito de estresses abióticos, entretanto com recuperação ao final representando possível adaptação ao estresse como em *Toona ciliata* (ANDRADE *et al.*, 2020; SÁ *et al.*, 2023).

Diante disso, estudos são fundamentais para a compreensão do comportamento morfofisiológico da espécie em diferentes condições hídricas e do uso da adubação de rustificação com o objetivo de aumentar a tolerância. Portanto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a morfologia e fisiologia de plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes reposições hídricas no solo com o uso de adubações de rustificação.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O experimento foi conduzido no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, Campus de Rio Verde – GO em casa de vegetação climatizada. As mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* foram produzidas no viveiro de silvicultura, sendo transplantadas em vasos de 6 Litros (L). Foram transplantadas mudas com altura média de 20 cm e diâmetro do coleto a partir de 3 mm.

Para o preenchimento dos vasos, utilizou-se terra de subsolo, areia e composto orgânico de milho na proporção 3:1:1 (60; 20; 20 %), acrescentado de fertilizantes aplicados na adubação de base. O substrato utilizado possuía as seguintes características: pH em CaCl<sub>2</sub> de 5,6; 22,84 mg dm<sup>-3</sup> de P; 190 mg dm<sup>-3</sup> de K; 5,98 cmolc dm<sup>-3</sup> de Ca; 1,80 cmolc dm<sup>-3</sup> de Mg; 2,80 cmolc dm<sup>-3</sup> de H+Al; 24,5 g dm<sup>-3</sup> de matéria orgânica e 64,7% de saturação por bases. No preparo do substrato foram aplicados 100; 300; e 150 mg.dm<sup>3</sup> de N; P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O por vaso, sendo utilizados como fontes de nutrientes o cloreto de potássio, fosfato monoamônico e sulfato de amônio.

As mudas foram aclimatadas por dez dias (totalizando 120 dias) desde a produção das mudas até o estabelecimento de regimes de irrigação, que consistiam na manutenção diária de umidade do substrato a 30% (CC1), 40% (CC2), 50% (CC3), 60% (CC 4) e 70% (CC5) do máximo de água capacidade de retenção pelo substrato, também chamada de capacidade de campo (Silva *et al.*, 2014).

O experimento foi conduzido em delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 2x5, sendo testados cinco reposições hídricas (30; 40; 50; 60 e 70%) no solo pela determinação da capacidade de campo (CC) e duas adubações potássicas de rustificação (parcial e completa) aplicadas em cobertura na fase de produção de mudas com 4 blocos, totalizando 40 unidades experimentais. A unidade experimental foi composta de dois vasos contendo uma planta jovem de *Acrocarpus fraxinifolius*, totalizando 80 plantas.

Os tratamentos correspondentes aos níveis de umidade do solo foram mantidos por 30 dias quando o experimento foi concluído. A água evapotranspirada foi substituída diariamente pela método gravimétrico, visando repor a quantidade de água suficiente para manter o umidade.

Para a adubação de rustificação, foram realizadas as adubações parciais utilizando 1/4 (um quarto) da dose recomendada (parcial) e a dosagem recomendada (completa) aos 90 e 105 dias após a emergência das sementes de cedro indiano nos tubetes, de acordo com a fertilização usada no viveiro florestal da ESALQ proposta por Benedetti, (2015). Segundo essa proposta a quantidade de K usada na adubação de rustificação é de 100 g de K<sub>2</sub>O para 100 litros de água utilizados para regar 10.000 mudas, sendo utilizado como adubo o cloreto de potássio (KCl) com 60% de K<sub>2</sub>O.

As mudas utilizadas no experimento foram produzidas em tubetes de 55 cm<sup>3</sup>, preenchidos com substrato comercial Maxfertil e casca de arroz carbonizada na

proporção 2:1, com adubação de base, cobertura e rustificação realizadas de acordo com as descritas na tabela 1.

**Tabela 1.** Adubação de base, cobertura e rustificação utilizada na produção de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* com rustificação total e parcial durante a fase de viveiro.

<b>Adubação de Base</b>		
Dose de nitrogênio (Ureia)	Dose de fósforo (Superfosfato triplo)	Dose de potássio (Cloreto de potássio)
-----g.m <sup>3</sup> -----		
150	300	100
<b>Adubação de cobertura</b>		
Dose de nitrogênio (Sulfato de amônia)	Dose de fósforo (Superfosfato triplo)	Dose de potássio (Cloreto de potássio)
-----g para cada 100 litros de água-----		
210	Não realizado	120
<b>Adubação de rustificação*</b>		
Dose de potássio (Cloreto de potássio) -----g para cada 100 litros de água-----		
Parcial		Completa
25		100

\*- Adubação realizada aos 90 e 105 dias após a emergência das plântulas nos tubetes.

Os índices de clorofila foram avaliados com medidor portátil, ClorofiLOG1030® (Falker®, Porto Alegre, Brasil), sendo obtido os índices de clorofila *a*, *b* e totais, expressos no índice Clorofilog. Em seguida foi mensurado o índice de clorofila *a/b*. As avaliações foram realizadas no terceiro par de folhas totalmente expandidas.

As trocas gasosas foram medidas simultaneamente com a avaliação da fluorescência da clorofila *a* na mesma folha da fotossíntese como analisador de gases (IRGA) (Li-cor, Nebraska, USA). Foram registradas as taxas fotossintéticas ( $A$ ,  $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), condutância estomática ( $g_s$ ,  $\text{mol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), taxa transpiratória ( $E$ ,  $\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), concentração interna de  $\text{CO}_2$  ( $C_i$   $\mu\text{mol mol}^{-1}$ ), e relação entre a dose interna e externa de  $\text{CO}_2$  ( $C_i/C_a$ ) determinadas em folhas totalmente expandidas em sistema aberto, sob luz saturante ( $1000 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e  $400 \mu\text{mol de CO}_2 \text{ mol}^{-1}$  de ar. As avaliações foram realizadas no terceiro par de folhas totalmente expandidas, entre às 8h e 11h da manhã, sob radiação fotossinteticamente ativa constante (PAR,  $1000 \mu\text{mol de fótons m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) e dose de  $\text{CO}_2$  ( $\sim 415 \mu\text{mol mol}^{-1}$ ), temperatura ( $\sim 25,5^\circ\text{C}$ ) e umidade relativa ( $\sim 74\%$ ) ambientes. Em cada folha foi utilizada sempre a mesma área.

Na avaliação da fluorescência da clorofila *a* foram obtidos a fluorescência inicial ( $F_0$ ), os rendimentos quânticos potencial ( $F_v/F_m$ ) e efetivo de conversão fotoquímica do fotossistema II (FSII) ( $Y_{II}$ ), coeficiente de dissipação fotoquímica ( $q_P$ ), taxa de transporte de elétrons (ETR) e rendimento quântico de dissipação regulada (YNPQ).

O potencial hídrico foliar ( $\Psi_{\text{am}}$ ) foi mensurado na antemanhã e às 12 horas usando bomba de pressão do tipo Scholander (Modelo 3005-1412, Soilmoisture Equipment Corp., Goleta, CA, USA).

A permeabilidade da membrana foi avaliada em discos foliares ( $1,96 \text{ cm}^2$ ) pela taxa de liberação de eletrólitos (TLE), obtida com o auxílio de um condutivímetro digital portátil (CD-850, Instruthern, São Paulo, Brasil), de acordo com a metodologia descrita por Vasquez-Tello *et al.*, (1990) e Pimentel *et al.* (2002). Inicialmente os discos foliares foram imersos em 30 mL de água deionizada em frascos de vidro âmbar e mantidos em repouso. Após 24 h, a condutividade livre da solução (CL,  $\mu\text{S/cm}$ ) foi mensurada. Posteriormente, os frascos foram colocados em estufa a  $100^\circ\text{C}$  por 1 hora para obtenção da condutividade total (CT,  $\mu\text{S/cm}$ ) da solução. A TLE foi calculada com a seguinte fórmula:  $\text{TLE (\%)} = [(CL/CT) \times 100]$ . A coleta dos discos foliares foi realizada às 08h.

Para as variáveis morfológicas foi feita a mensuração dos dados biométricos de altura da parte aérea (H), medindo com o auxílio de uma régua milimétrica com resultados expressos em (cm) entre o coleto e o ápice caulinar e o diâmetro do coleto (DC) utilizando um paquímetro digital, sendo expresso o resultado em (mm).

Em seguida, as partes constituintes das plantas foram pesadas em balança analítica com precisão de 0,01 g, e foi feita a pesagem (em balança digital analítica,

modelo AW 220) para obtenção da biomassa, após secagem do material vegetal. Foram avaliados, massa seca radicular (MSR), massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) sendo expresso seu resultado em g planta<sup>-1</sup>. A partir dos valores obtidos com estes parâmetros morfológicos avaliados, foi calculado o índice de robustez (H/DC).

As avaliações morfológicas, fisiológicas, fluorescência da clorofila *a*, relações hídricas, índices de clorofila, taxa de liberação de eletrólitos, e o Índice de qualidade de Dickson foram realizadas aos trinta (30) dias após estabelecimento dos regimes hídricos pela CC.

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância pelo teste F ao nível de 5% de probabilidade e, em casos de significância, foi realizada a análise de regressão polinomial linear e quadrática para os regimes de irrigação pela capacidade de campo (CC). Para o fator adubação de rustificação, as médias foram comparadas entre si pelo teste Tukey a 5% de probabilidade, utilizando o programa estatístico SISVAR® (FERREIRA, 2011).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Trocas gasosas, fluorescência da clorofila *a* e eficiência do uso da água

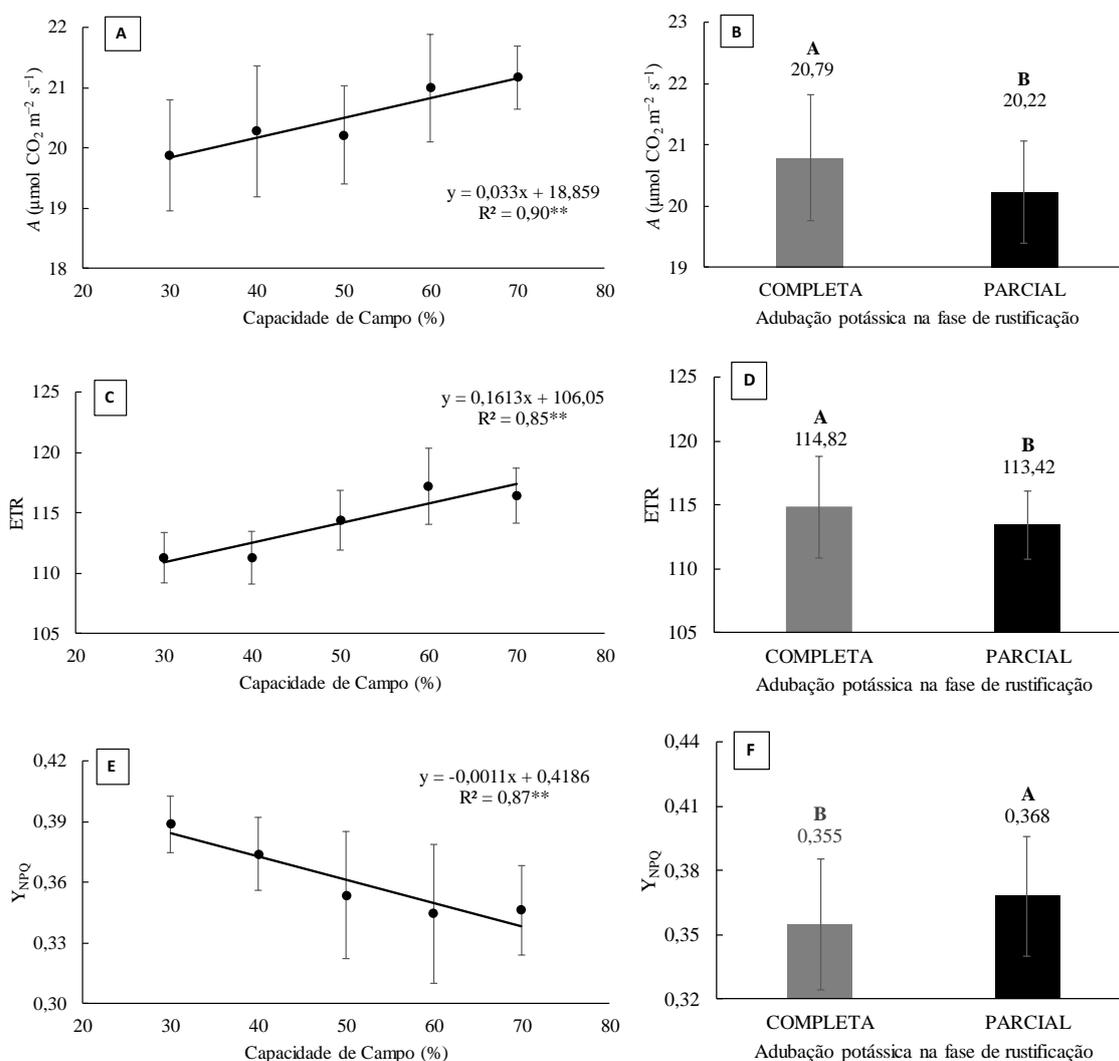
As trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* foram afetadas diferentemente, de acordo com os tratamentos impostos. As variáveis taxa fotossintética (*A*), taxa de transporte de elétrons (ETR) e rendimento quântico de dissipação regulada ( $Y_{NPQ}$ ), apresentaram diferenças significativas independentes entre os regimes de irrigação e as adubações potássicas de rustificação (Figura 1). Em relação aos regimes de irrigação, observou-se acréscimos na *A* e ETR até 70% da máxima capacidade de retenção de água no solo (Figura 1 A e C), enquanto para o  $Y_{NPQ}$  foram observadas reduções com o aumento dos regimes de irrigação (Figura 1 E).

A adubação potássica de rustificação completa proporcionou maiores valores de *A* e ETR (Figura 1 B e D). Enquanto a adubação potássica de rustificação parcial proporcionou maiores valores para o  $Y_{NPQ}$  (Figura 1 F).

O modelo de regressão de melhor ajuste para as variáveis *A*, ETR e  $Y_{NPQ}$  em função dos regimes de irrigação foi o linear. Observou-se que o aumento de cada 10% da capacidade máxima de retenção de água no solo proporcionou aumento de 1,56 e

1,37% para A e ETR, respectivamente. Enquanto para o  $Y_{NPQ}$  foram observadas reduções de 2,85 % para o aumento de cada 10% do regime de irrigação.

Adubações potássicas de rustificação completas proporcionaram aumento de 2,82 e 1,23 % em comparação a adubação de rustificação parcial para a A e ETR, respectivamente, enquanto para o  $Y_{NPQ}$  foram observados decréscimos de 3,53% para adubação de rustificação completa comparada à parcial.



**Figura 1.** Taxa fotossintética (A) – (A, B); Taxa de transporte de elétrons (ETR)- (C, D) e Rendimento quântico de dissipação regulada ( $Y_{NPQ}$ )- (E, F) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Aspectos fisiológicos, como reduções na assimilação de  $\text{CO}_2$  líquido, transpiração, condutância estomática, potencial hídrico foliar e rendimento quântico

potencial do fotossistema II são observados em condições de déficit hídrico (D'ODORICO; PORPORATO; RUNYAN, 2019).

Em diferentes regimes de irrigação Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) observaram maiores valores para a  $A$  na capacidade de campo de 80%, ocorrendo a partir desse nível decréscimo para esses parâmetros, no entanto não foi possível determinar a melhor capacidade de campo para a  $A$  do cedro indiano já que os tratamentos testados indicam bom desenvolvimento até a capacidade de campo de 70%.

Queiroz *et al.* (2017) avaliando as trocas gasosas em mudas de *Eucalyptus globulus* submetidos a diferentes lâminas de irrigação, 120 dias após o transplântio observaram que mesmo na condição de menor disponibilidade hídrica, as plantas apontaram maior taxa de fotossíntese ( $A$ ), correspondente a  $28,29 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , contrariando os resultados obtidos no presente estudo.

Scalon *et al.* (2011) avaliando o déficit hídrico no crescimento de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia*) observaram que a  $g_s$ ,  $A$  e  $E$  foram menores sob 12,5% da capacidade de campo, porém a eficiência no uso da água não variou entre as diferentes conforme resultados obtidos para o cedro indiano. Segundo o autor para mudas de *Guazuma ulmifolia* o regime hídrico na fase inicial deve ser de 100% da capacidade de campo, porém as mudas cresceram satisfatoriamente sob 50% e em doses abaixo de 25% da capacidade de campo as mudas entram em estresse hídrico antes dos 35 dias de cultivo.

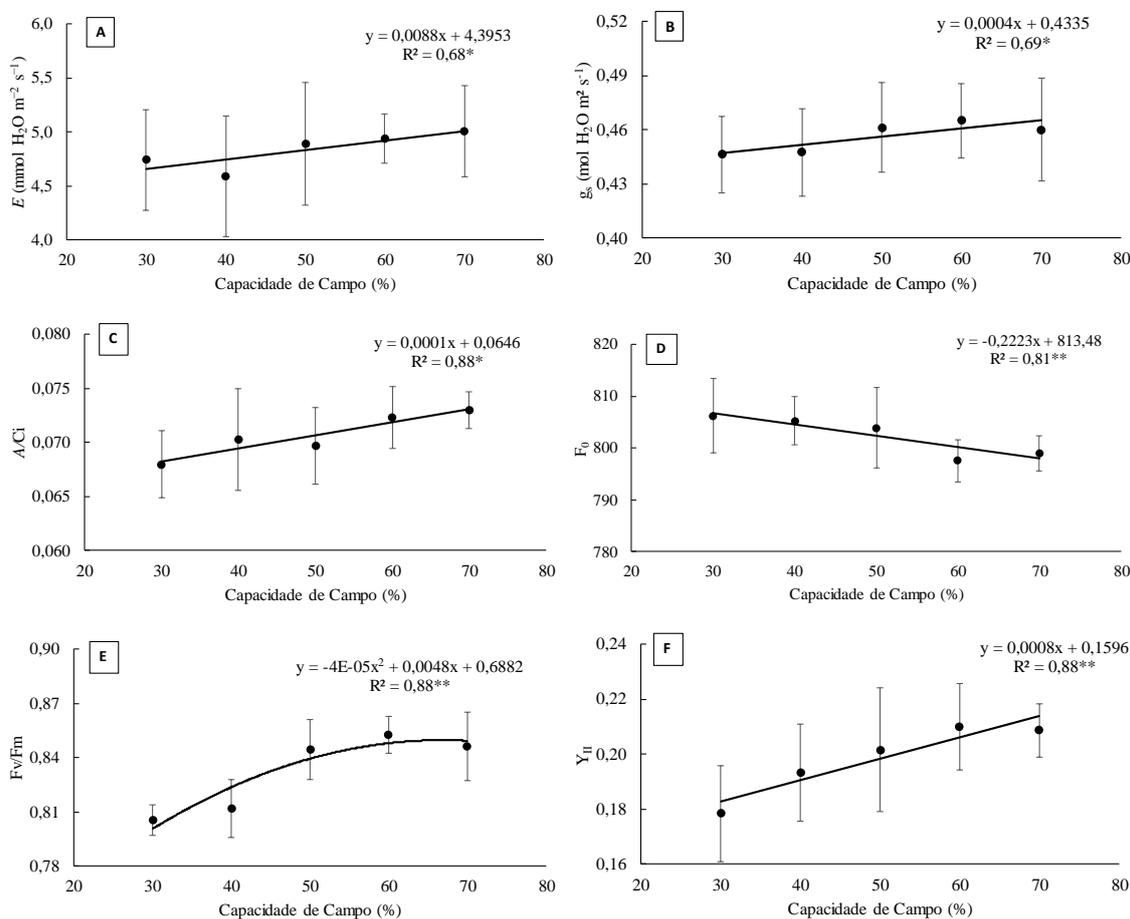
Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) em *Erythroxylum pauferrense* observaram que as plantas submetidas a regimes hídricos de 100% e 80% da CC apresentam maior desenvolvimento e desempenho morfofisiológico, com reduções no regime de maior estresse hídrico de 20% da CC.

Como em viveiros florestais o manejo da adubação de rustificação tem o objetivo de promover a resistência das mudas ao estresse provocado pelas atividades de plantio, como a falta de umidade no solo, retirada dos tubetes e transporte (D'ÁVILA *et al.*, 2011), adubações de rustificação completa permitiram melhor estabelecimento aumentando as taxas fotossintéticas e de transporte de elétrons.

A taxa transpiratória ( $E$ ), condutância estomática ( $g_s$ ), eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ ), fluorescência inicial ( $F_0$ ), rendimento quântico potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ ) e rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $Y_{II}$ ) diferiram somente para os regimes de irrigação pela capacidade máxima de retenção de água do solo (Figura 2).

Para a  $E$ ,  $g_s$ ,  $A/C_i$ ,  $F_0$  e  $Y_{II}$  o modelo de regressão de melhor ajuste foi a linear (Figura 2 A, B, C, D e F), enquanto para o  $F_v/F_m$  a equação de melhor ajuste foi a quadrática (Figura 2 E). O aumento de cada 10% da capacidade máxima de retenção de água no solo proporcionou aumento de 1,76; 0,87; 1,40 e 3,71 % para  $E$ ,  $g_s$ ,  $A/C_i$  e  $Y_{II}$ , respectivamente, enquanto para a  $F_0$  foram observadas reduções de 0,28 % para o aumento de cada 10 % do regime de irrigação.

Para a  $F_v/F_m$  o regime de irrigação na capacidade de campo de 60% proporcionou maiores valores, sendo este superior em 5,60; 2,89; 1,02 e 0,17% superior aos regimes de irrigação de 30; 40; 50 e 70 % da capacidade de campo (Figura 2 E). De acordo com a equação quadrática observou-se ponto de máxima no regime de irrigação de 67 % com  $F_v/F_m$  de 0,85.



**Figura 2.** Taxa transpiratória ( $E$ ) - A, Condutância estomática ( $g_s$ )-B, Eficiência instantânea de carboxilação ( $A/C_i$ )-C, Fluorescência inicial ( $F_0$ )-D, Rendimento quântico potencial do fotossistema II ( $F_v/F_m$ )- E e Rendimento quântico efetivo do fotossistema II ( $Y_{II}$ )-F em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Em condições de déficit hídrico ocorre o fechamento estomático das plantas, visando à redução da perda de água por transpiração (MEDEIROS *et al.*, 2013). Com isso, ocorre a restrição à entrada de CO<sub>2</sub> em função da redução da condutância estomática, resultando na redução das taxas de transpiração e fotossíntese (BRITO *et al.*, 2018).

Os menores valores de  $A$ ,  $g_s$  e  $E$  encontrados no tratamento, com menor quantidade de água disponível no solo, podem ser explicados pelo controle estomático mais rigoroso e necessário em plantas sob estresse condições, limitando a condutância estomática com menor abertura dos estômatos e reduzindo a transpiração evitando a perda excessiva de água (LAMBERS; OLIVEIRA, 2019).

Este aumento observado em  $F_0$  nas condições de maior estresse hídrico em relação as condições de melhor disponibilidade de água, possivelmente ocorreu pela redução na capacidade de transferência de energia de excitação para o fotossistema II, indicando possível destruição do centro de reação do PSII (KALAJI *et al.*, 2017). Conforme observado no presente estudo, condições severas de estresse podem alterar a estrutura dos pigmentos fotossintéticos no PSII, elevando os valores de  $F_0$  (FEYZIYEV, 2020).

Plantas submetidas a déficit hídrico favorecem o desenvolvimento de órgão específicos da planta, como as raízes para melhorar a absorção de água e evitar a perda via estômatos (TAIZ *et al.*, 2021), causando a diminuição na  $g_s$  e  $E$ , conforme observado para as mudas de cedro indiano.

Silva, (2019) em clones de eucalipto com tolerância diferencial a seca não foram observadas limitações fotoquímicas, com relação a razão  $F_v/F_m$  sempre mantendo próxima a 0,8, nos clones foi observada redução na ETR somente sob seca severa, com variação de 25 a 50  $\mu\text{mol e}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ , enquanto nos controles esses valores mantiveram-se acima de 125  $\mu\text{mol e}^{-1} \text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

Uma diminuição na  $g_s$  pode ocorrer na fase inicial do déficit hídrico e, portanto, a quantidade de CO<sub>2</sub> que entra por difusão nos estômatos podem diminuir para níveis que não atendem as demandas da fotossíntese da planta, levando a redução na  $A$  (SONG *et al.*, 2020), conforme observado para as mudas de *Acrocarpus fraxinifolius*.

Plantas sob déficit hídrico mais intenso não conseguem absorver água do solo na mesma magnitude que plantas sob condições hídricas adequadas (MEDEIROS *et al.*, 2023). Perdas através da transpiração, ocorre em plantas sob déficit resultando no

fechamento estomático com diminuição da condutância e redução do potencial hídrico (XAVIER *et al.*, 2019), que são estratégias para a planta manter turgor e evitar a evapotranspiração (MEDEIROS *et al.*, 2023).

O rendimento quântico máximo ( $F_v/F_m$ ) representa a eficiência de conversão de energia da luz absorvida no centro de reação do fotossistema II, valores elevados desta variável indicam maior atividade fotoquímica (DA SILVA RIBEIRO *et al.*, 2023) conforme observado.

De acordo com Soares *et al.* (2018), plantas que obtiverem valores entre 0,75 e 0,85 estão com o aparato fotossintético intacto (sem danos), evidenciando de acordo com o presente estudo que as plantas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas aos maiores e menores níveis de água apresentaram bons valores de rendimento quântico.

Clones de eucalipto submetidos a quatro diferentes regimes de irrigação também apresentaram redução da condutância estomática e taxa fotossintética em condições de restrição hídrica, provavelmente pelo fechamento parcial dos estômatos logo nas primeiras horas da manhã, por causa da baixa umidade encontrada no substrato (TATAGIBA; PEZZOPANE; REIS, 2008).

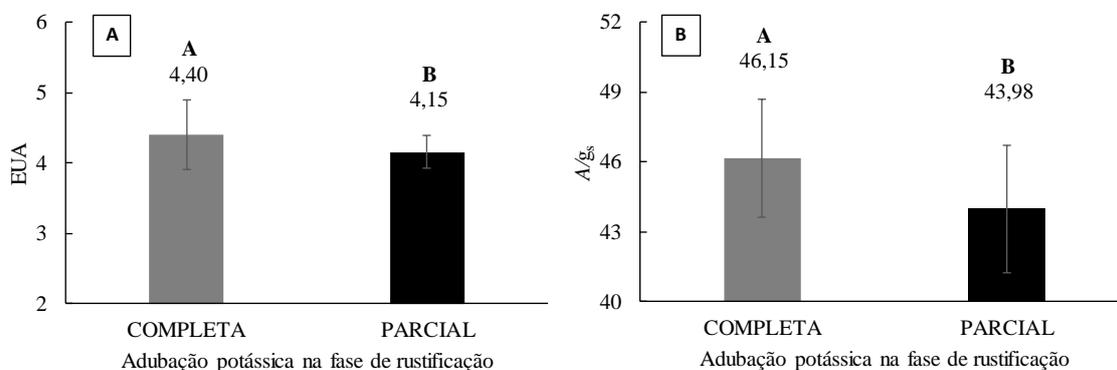
Apesar de *Khaya senegalensis* ser uma espécie moderadamente tolerante o déficit hídrico (CALIXTO JÚNIOR *et al.*, 2016), acentuada redução da disponibilidade de água no solo diminui o crescimento, a transpiração, condutância estomática e a taxa fotossintética, aumentando a eficiência do uso da água (PEREZ *et al.*, 2016), corroborando com os resultados obtidos para o cedro indiano.

Osakabe *et al.* (2014) afirmaram que as plantas apresentam menor potencial hídrico foliar, e menores valores de  $A$ ,  $E$ ,  $g_s$  e  $C_i$  sob déficit hídrico, reduzindo a assimilação de  $CO_2$  e, conseqüentemente, proporcionando menor produção de biomassa, conforme observado para a biomassa das mudas de cedro indiano.

Cano *et al.* (2014) observaram que a diminuição em  $g_s$  leva à redução de concentração interna de  $CO_2$   $C_i$  em plantas com déficit hídrico, limitando a fotossíntese, no entanto não foram observados no presente estudo reduções na  $C_i$  das plantas de cedro indiano.

Este comportamento da  $A/C_i$  pode ter ocorrido pelo fechamento estomático associado à deficiência hídrica das plantas, diminuindo a taxa fotossintética e conseqüentemente a eficiência da carboxilação, limitando a assimilação de  $CO_2$  e menor atividade da Rubisco (MEJÍA-DE TAFUR *et al.*, 2017).

A eficiência instantânea do uso da água (EUA) e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ ) diferiu somente para as adubações de rustificação (Figura 3). Acréscimos foram observados para a EUA e  $A/g_s$  para adubação completa de rustificação em comparação à adubação parcial, com incremento de 6,02 e 4,93 % respectivamente (Figura 3 A e B).



**Figura 3.** Eficiência instantânea do uso da água (EUA)- A e eficiência intrínseca do uso da água ( $A/g_s$ )- B em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubação de potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após transplantio. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

Embora o déficit hídrico tenha promovido menor produção de biomassa em todas as partes da planta, no estudo de Andrade *et al.* (2020), os autores identificaram em *Toona cilata* que a espécie apresentou maior eficiência no uso da água, sendo relacionado com a redução da área foliar ocorrendo menor perda de água, fato não observado nas mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* nos regimes de irrigação testados indicando que o estresse hídrico nas plantas aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos não desencadearam mecanismos de economia de água.

Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) em plantas de *Erythroxylum paufferrense* também não encontraram diferenças dos níveis de água no solo para EUA. De acordo com Medeiros *et al.*, (2023) regimes de irrigação mais restritivos que diminuem o conteúdo de água do solo proporcionam reduções nas trocas gasosas, com maiores reduções na  $g_s$  e  $E$  em relação a  $A$ , aumentando a EUA, porém no cedro indiano aos 30 dias após o estabelecimento dos regimes de irrigação a EUA não foi afetada pelo conteúdo de água no solo.

Souza *et al.* (2018) estudaram a eficiência de uso da água de *Toona ciliata* e observaram que a espécie apresentou os menores valores de evapotranspiração, entre as

espécies avaliadas, evidenciando que *Toona ciliata* dispõe de mecanismos avançados de economia de água.

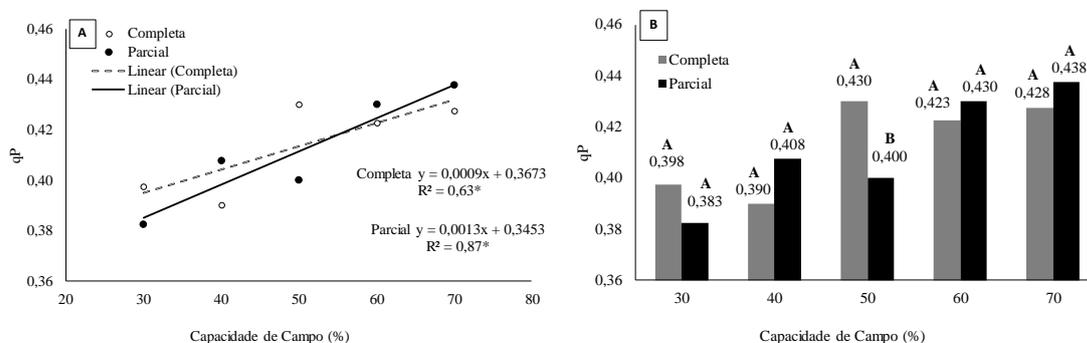
A menor transpiração indica maior eficiência no uso de água, sendo este fator importante a ser considerado para a sobrevivência pós-plantio (SPADA *et al.*, 2019), porém, não foi possível observar no presente estudo reduções na transpiração em resposta a adubação de rustificação.

O aumento observado para EUA na adubação de rustificação completa, pode ser explicado pela utilização desse tipo de fertilização mineral proporcionar maior resistência durante os períodos secos e de geadas e por aumentar o potencial de retenção hídrica nos indivíduos nutridos, suficientemente, com o potássio (K) (GONÇALVES *et al.*, 2015; BATTIE-LACLAU *et al.*, 2016).

Para o coeficiente de dissipação fotoquímica (qP) houve interação significativa entre a capacidade de campo e adubação de rustificação (Figura 4), nota-se para o qP aos 30 dias após estabelecimento do regime hídrico quando se avalia as capacidades de campo em cada adubação de rustificação utilizada o incremento com o aumento da capacidade de campo na adubação parcial e completa.

Para a adubação de rustificação completa, o qP adequou-se ao modelo de equação linear, sendo observado na capacidade de campo de 70% o maior qP, estimado em 0,35 com aumento de 0,014 % em relação a capacidade de campo de 30 %. Para a adubação de rustificação parcial, o aumento da capacidade de campo aumentou o qP em 2,09% a cada 10%.

Ocorreu diferença estatística quando comparada as adubações de rustificação apenas na capacidade de campo de 50% (Figura 4 B), em que a adubação de rustificação completa proporcionou aumento de 7,50 % no qP quando contrastada com a adubação de rustificação parcial.



**Figura 4.** Coeficiente de dissipação fotoquímica (qP)- (A; B) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa

submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

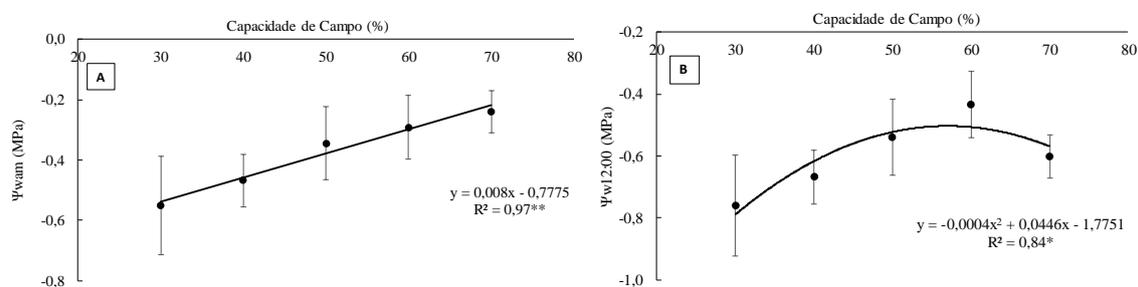
Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

O qP representa a relação entre o fluxo de energia absorvida e a energia dissipada, sendo um dos principais parâmetros a serem influenciados pelas tensões de água no solo (SÁ *et al.*, 2023), possivelmente indicando a máxima eficiência do PSII ou o potencial atividade fotossintética, conforme observado no presente estudo no tratamento de 70% da CC.

### 3.2 Potencial hídrico foliar

Os valores de potencial hídrico foliar de antemanhã ( $\Psi_{wam}$ ) e potencial hídrico às 12 horas diferiram apenas para os regimes de irrigação, não diferindo das adubações de rustificação na produção de mudas (Figura 5). Menores valores de  $\Psi_{wam}$  e  $\Psi_{w12:00}$  foram obtidos nas plantas sob condição de menor regime de irrigação na capacidade de campo de 30%.

Para o  $\Psi_{wam}$  o modelo de regressão de melhor ajuste foi o linear (Figura 5 A), indicando aumento de 14,86% para o aumento de cada 10% no conteúdo de água no solo, com máximo  $\Psi_{wam}$  (- 0,22 MPa) na capacidade de campo de 70%, sendo observado que o aumento na capacidade de campo proporciona maiores valores para os potenciais hídricos foliares ( $\Psi_w$ ). O  $\Psi_{w12:00}$  adequou-se ao modelo de regressão quadrático com ponto de máximo na capacidade de campo de 55,75 % sendo observado  $\Psi_w$  de - 0,53 MPa (Figura 5 B).



**Figura 5.** Potencial hídrico foliar na antemanhã ( $\Psi_{wam}$ )- A e Potencial hídrico foliar ao meio-dia ( $\Psi_w$  12:00)- B em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

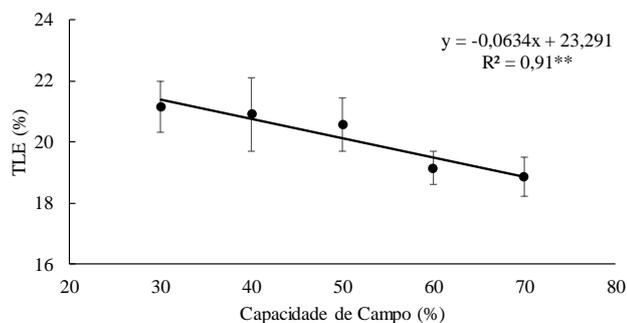
O conteúdo relativo de água nas folhas pode ser considerado como indicação das condições das plantas em diferentes ambientes hídricos para determinar o regime ideal que favorece o desempenho fisiológico das plantas (DA SILVA RIBEIRO *et al.*, 2023). A redução do conteúdo relativo de água (CRA) altera significativamente as respostas fisiológicas das plantas de forma a afetar a integridade do aparato fotossintético, podendo causar distúrbios no crescimento dos vegetais (ZEGAOUI *et al.*, 2017).

Medeiros *et al.* (2023) em mudas de *Corymbia citrodora* aos 110 dias após o estabelecimento dos regimes hídricos, observaram que potencial hídrico foliar, tanto na madrugada quanto ao meio-dia, aumentou à medida que a disponibilidade de água foi maior, mas os valores observados ao meio-dia foram inferiores aos observados na madrugada corroborando com os resultados obtidos para o potencial hídrico foliar de *Acrocarpus fraxinifolius*.

Xavier *et al.* (2019) estudando dois genótipos comerciais de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* e afirmou que a redução recorrente na disponibilidade de água afetou potencial hídrico foliar e trocas gasosas em mudas.

### 3.3 Taxa de extravasamento de eletrólitos

A taxa de liberação de eletrólitos (TLE) apresentou diferenças significativas apenas para o regime de irrigação. Maiores valores para TLE foram observados na capacidade de campo de 30%, ocorrendo reduções com o aumento da capacidade de campo (Figura 6). O aumento de cada 10% na capacidade de campo proporcionou reduções de 2,96 % na TLE.



**Figura 6.** Taxa de liberação de eletrólitos (TLE) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP.

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Conforme observado, o decréscimo da TLE nas plantas sob maiores regimes de irrigação houve menor extensão do dano em membranas celulares (Djanaguiranan *et al.*, 2018). No período de estudo o excesso de energia radiante não está sendo direcionado ao extravasamento do conteúdo celular, subsequente à saída de íons da célula (Fernández-Crespo *et al.*, 2014), ocorrendo pequenas reduções em plantas sob déficit hídrico.

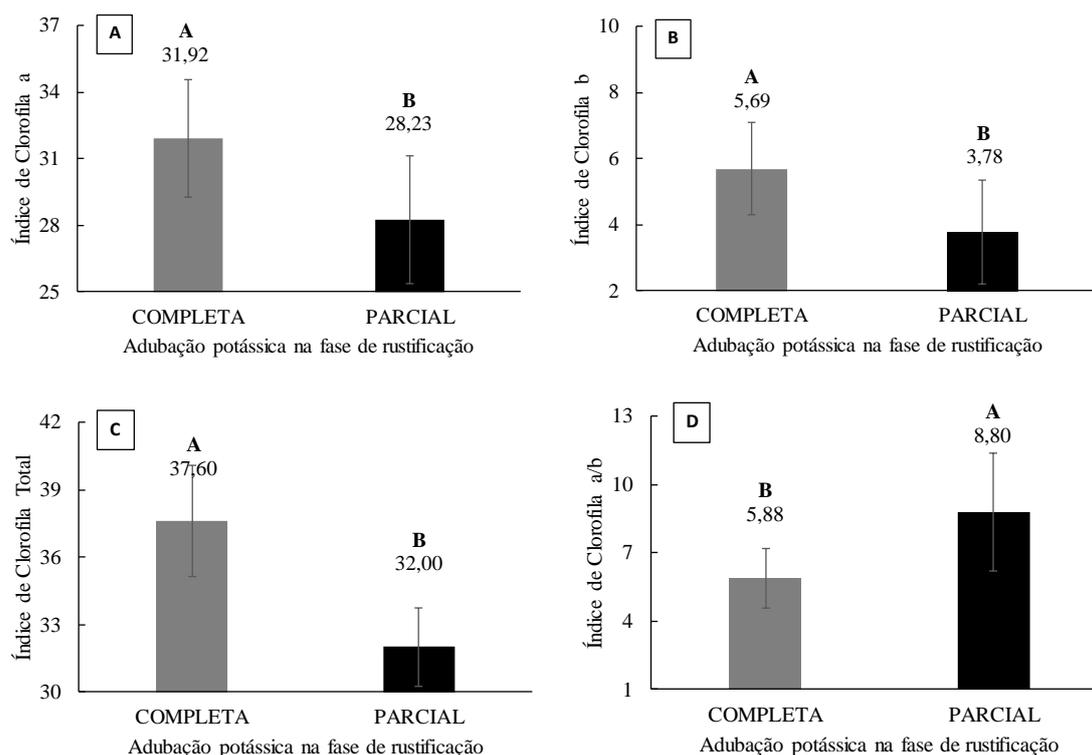
A manutenção da estabilidade das membranas é fator importante na tolerância a estresses. Zhang *et al.* (2016) observaram que plantas de *Arabidopsis* foram mais tolerantes ao estresse, pela capacidade de manter a integridade das membranas dos cloroplastos.

A falta de resposta da taxa de liberação de eletrólitos para as adubações de rustificação pode estar associado ao menor efeito do K nos danos na membrana celular, conforme observado por Costa, (2020) corroborando com os resultados obtidos no presente estudo.

### 3.4 Índices de clorofila

Para os índices de clorofila *a*, *b*, totais e índice de clorofila *a/b* foram observados efeitos significativos somente em função das adubações potássicas de cobertura na produção das mudas de cedro indiano (Figuras 7). Acréscimos foram observados para os índices de clorofila *a*, *b*, totais para adubação completa de rustificação em comparação à adubação parcial, com incremento de 13,07; 50,53 e 17,50 % respectivamente (Figura 7 A, B e C).

As mudas de cedro indiano produzidas com adubação potássica parcial proporcionaram após o transplântio maiores valores para o índice de clorofila *a/b* em comparação a adubação potássica de rustificação completa (Figura 7 D), sendo observadas reduções de 33,18% da adubação parcial para a completa.



**Figura 7.** Índice de clorofila a -A, Índice de clorofila b -B; Índice de clorofila total -C, Índice de clorofila a/b – D em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após o transplântio. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

Perez, (2014) avaliando doses de potássio e umidade do solo em plantas de mogno africano observaram que doses crescentes de potássio aplicadas no substrato não proporcionaram efeito significativo no índice de conteúdo de clorofila. Portanto, o potássio pode ser um nutriente utilizado na fase de rustificação das mudas, antes do transplântio, conforme observado para o cedro indiano que foram observados incrementos nos índices de clorofila em adubações potássicas de rustificação completa.

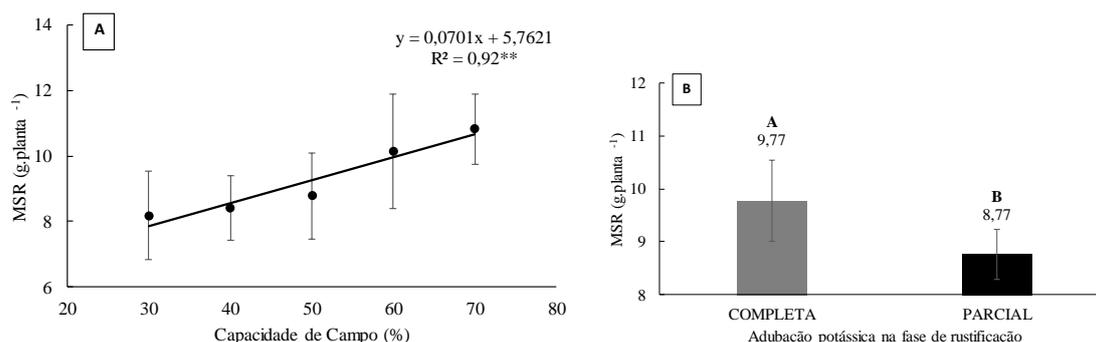
Em condições de baixa disponibilidade hídrica pode ocorrer maior sensibilidade desses pigmentos e conseqüentemente causar fotoinibição, diminuindo a atividade no aparelho fotossintético das plantas, além de influenciar processos celulares como expansão celular e divisão (KARGAR *et al.*, 2017). No presente estudo foram observados efeitos nos parâmetros de fluorescência da clorofila a, porém sem efeitos do estresse hídrico nos índices de clorofila.

### 3.5 Parâmetros morfológicos

As variáveis biométricas foram afetadas diferentemente, de acordo com os tratamentos impostos. Para a massa seca radicular (MSR) foi observado diferença significativa independente entre os regimes de irrigação e as adubações potássicas de rustificação (Figura 8).

Em função da capacidade de campo testada o modelo de regressão de melhor ajuste para MSR foi o linear, sendo observado incremento com o aumento da capacidade de campo (Figura 8 B). Para a MSR de acordo com equação de regressão o aumento de cada 10 % na capacidade de campo proporcionou o incremento de 6,57% (0,70 g por planta<sup>-1</sup>).

As mudas produzidas com adubação potássica de rustificação completa proporcionaram após o transplântio maiores valores para a MSR em comparação a adubação potássica de rustificação parcial (Figura 8 B), com incremento de 11,40 % (1 g por planta<sup>-1</sup>) da adubação completa para a parcial.



**Figura 8.** Massa seca radicular (MSR) – (A, B) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com diferentes adubações potássicas de rustificação e submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média (n = 4) ± EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey (p > 0.05).

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Segundo Taiz *et al.* (2017), menor MSR sob restrição hídrica pode indicar que as plantas desenvolvem menor capacidade de exploração de água, necessitando de maior desenvolvimento do sistema radicular para suprir as atividades de transpiração no processo fotossintético.

Em *Corymbia citrodora* a MSR Medeiros *et al.* (2023) apresentou aumento linear, com incremento de 36,19 g. planta<sup>-1</sup> para o aumento de cada 15 % da máxima capacidade de retenção de água no solo, corroborando com os resultados obtidos. Para

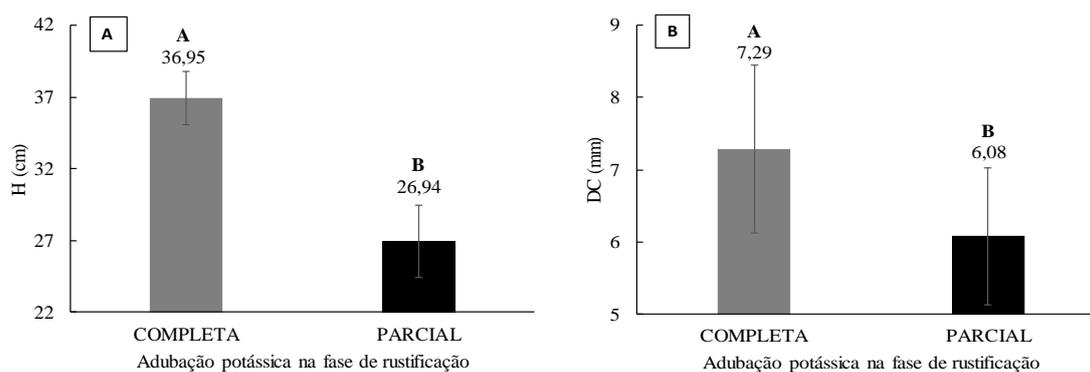
as mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* o incremento na MSR observado foi relativamente menor.

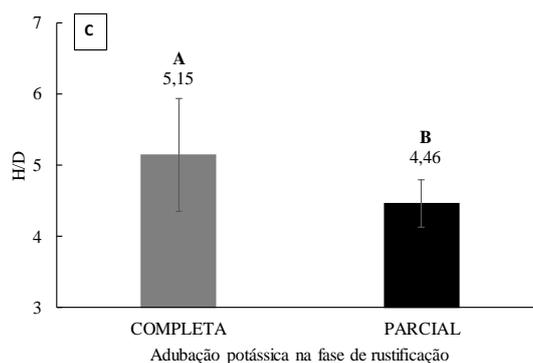
Sá *et al.* (2023) avaliando o estresse hídrico no crescimento inicial de mudas de *Toona ciliata* var. *australis* não observaram diferença significativa entre os níveis de tensão hídrica medidos no substrato para a MSR, enquanto Andrade *et al.* (2020) observaram respostas significativas de desenvolvimento das mudas de cedro australiano por meio de suspensão completa de irrigação.

Grossnickle e MacDonald (2018), analisando 23 trabalhos sobre qualidade de mudas, concluíram que em 78% deles, houve relação positiva entre a qualidade do sistema radicular e o crescimento pós-plantio, assim, no presente estudo pode-se verificar maior qualidade do sistema radicular em adubações potássicas completas.

Para as variáveis altura da parte aérea (H), diâmetro do coleto (DC) e índice de robustez (H/DC) foram observados efeitos significativos somente em função das adubações potássicas de cobertura realizadas na produção das mudas de cedro indiano (Figuras 9).

Foram observados acréscimos para a H; DC e H/DC das plantas produzidas com adubação completa de rustificação em comparação à adubação parcial, com incremento de 48,30; 16,60 e 15,57 % respectivamente (Figura 9 A, B e C). A adubação potássica de cobertura completa proporcionou aumento de 10,01 cm para H e 1,21 mm para DC em comparação a adubação potássica parcial.





**Figura 9.** Altura da parte aérea (H) -A, Diâmetro do coleto (DC)-B e Índice de robustez (H/DC) -C, em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa aos 30 dias após o transplante. Barras representam média (n = 4) ± EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

Efeitos maiores do déficit hídrico na H e DC foram observados em *Guazuma ulmifolia* aos 83 dias após o estabelecimento dos regimes hídricos (SCALON *et al.*, 2011), indicando que provavelmente efeitos do déficit hídrico não foram observados para essas variáveis por causa do menor tempo após o estabelecimento dos regimes hídricos, pois plantas submetidas a maior tempo de déficit hídrico tendem a exibir de maneira maior os efeitos fisiológicos na morfologia das mesmas (TAIZ *et al.*, 2021).

Em plantas de *Corymbia citrodora* Medeiros *et al.* (2023) observaram que as variáveis de crescimento H e DC foram favorecidas com o aumento da disponibilidade hídrica diferindo dos resultados obtidos em que não foram observados efeitos para H e DC do cedro indiano com o aumento dos regimes de irrigação. Esse fator pode ter ocorrido pelo tempo de avaliação para o cedro indiano ter sido menor, não sendo possível observar os efeitos do déficit hídrico nessas variáveis.

Como o potássio (K) na fase de rustificação favorece o aumento à resistência das mudas às condições adversas acelerando o crescimento inicial (BENEDETTI, 2015) e regula a abertura e fechamento estomático (TAIZ *et al.*, 2021), as plantas de cedro indiano apresentaram melhores parâmetros morfológicos para a H, DC e H/DC em adubações de rustificação completas.

Na fase de "rustificação", que dura de 15 a 30 dias, reduzem-se as regas e suspendem-se as adubações de cobertura, principalmente a nitrogenada favorecendo o engrossamento do caule (BENEDETTI, 2015). Com o objetivo de acelerar o crescimento inicial das mudas no campo, recomenda-se a adubação de rustificação antes de sair do viveiro (HIGASHI; DE ARRUDA SILVEIRA 2004).

Em plantas de *Erythroxylum pauferrense* Plowman sob estresse hídrico Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) observaram que a altura das plantas foi afetada pelos tratamentos hídricos a partir dos 120 dias após a emergência (DAE) até o período final do experimento (180 DAE), sendo os maiores valores registrados em 80% da CC e os menores nas plantas submetidas ao maior estresse hídrico em 20% da CC. Os autores observaram que o DC foi significativamente reduzido com o aumento do estresse hídrico, apresentando diferenças nas diferentes condições hídricas aos 150 e 180 DAE.

Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) atribuíram a redução observada na H e DC das plantas no maior nível de estresse hídrico possivelmente pela diminuição da turgescência das células antes do fechamento dos estômatos, afetando negativamente o metabolismo e proporcionando diminuição no crescimento e desenvolvimento das plantas (SHABALA, 2012), porém não foram observadas reduções para as mudas de cedro indiano no período avaliado.

Para a massa seca da parte aérea (MSPA) e massa seca total (MST) das plantas de cedro indiano houve interação significativa entre a capacidade de campo e adubação de rustificação (Figura 10), nota-se para a MSPA quando se avalia as capacidades de campo em cada adubação de rustificação utilizada o incremento com o aumento da capacidade de campo na adubação parcial e completa.

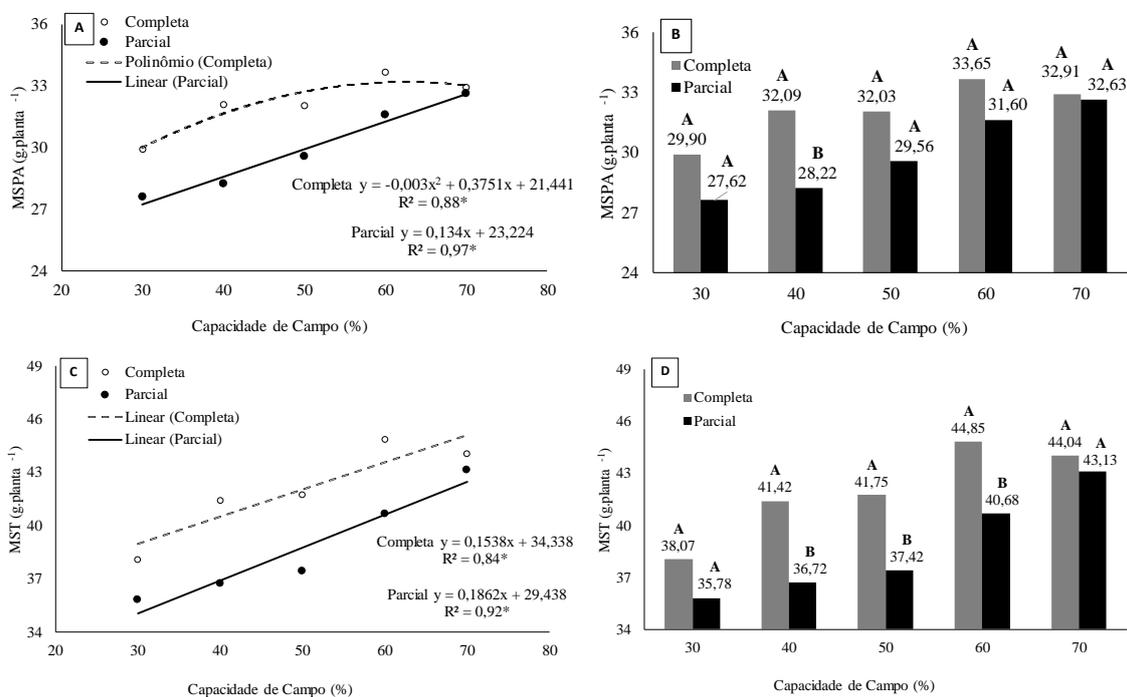
Para a adubação de rustificação completa, a MSPA adequou-se ao modelo de regressão polinomial de segundo grau com maior valor proporcionado na capacidade de campo de 60 %, estimado em 33,15 g. planta<sup>-1</sup>. Para a adubação de rustificação parcial, o aumento de 10 % na capacidade de campo proporcionou aumento de 4,12 % na MSPA.

Ocorreu diferença estatística quando comparada as adubações de rustificação apenas na capacidade de campo de 40% (Figura 10 B), em que a adubação de rustificação completa proporcionou aumento de 13,71 % na MSPA quando contrastada com a adubação de rustificação parcial.

Para a adubação de rustificação completa em função da capacidade de campo, a MST adequou-se ao modelo de regressão linear com maior valor proporcionado na capacidade de campo de 70 %, estimado em 45,10 g. planta<sup>-1</sup> (Figura 10 C). Para a adubação de rustificação parcial, o aumento de 10% na capacidade de campo proporcionou aumento de 4,10% na MST (Figura 10 C).

Ocorreu diferença estatística para a MST quando comparada as adubações de rustificação apenas nas capacidades de campo de 40; 50 e 60% (Figura 10 D), em que a

adubação de rustificação completa proporcionou aumento de 12,80; 11,57 e 10,25 % na MST quando contrastada com a adubação de rustificação parcial para as respectivas capacidades de campo.



**Figura 10.** Massa seca da parte aérea (MSPA) - (A; B) e massa seca total (MST)- (C; D) em mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* produzidas com adubações potássicas de rustificação parcial e completa submetidas a diferentes regimes de irrigação aos 30 dias após estabelecimento dos regimes hídricos. Barras representam média ( $n = 4$ )  $\pm$  EP. Médias seguidas de mesma letra maiúscula não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p > 0.05$ ).

Em que: ns – Não significativo pelo teste F, \*\* e \* significativo a 1% e 5% de probabilidade, respectivamente, pelo teste F.

Baixos valores de biomassa das plantas no menor regime hídrico em plantas de *Erythroxylum paufferrense*, podem ocorrer pelo mecanismo de defesa, diminuindo a emissão de novas folhas e provocando a perda de folhas, auxiliando na tolerância ao estresse hídrico (OJEDA; RUBILAR; MONTES; CANCINO; ESPINOSA, 2018). Segundo Taiz *et al.* (2017), esse mecanismo é uma das primeiras respostas das plantas às condições de escassez de água, permitindo a planta manter seu metabolismo, portanto as plantas de cedro indiano em condições de déficit hídrico limitaram a produção biomassa.

Essa diminuição observada provavelmente ocorreu pela baixa assimilação de  $CO_2$  pelas plantas, reduzindo a produção de fotoassimilados necessários ao crescimento e acúmulo de biomassa seca (ALVES *et al.*, 2018) proporcionando menor produção em plantas sob estresse.

De acordo com Tatagiba *et al.* (2015), a disponibilidade hídrica no substrato entre 70% e 90% da capacidade de retenção são responsáveis pela maior produção de biomassa. Queiros *et al.* (2017) observaram em plantas de *Eucalyptus globulus*, tolerância a limitação hídrica, conseguindo manter seu crescimento mesmo nas menores lâminas de irrigação aplicadas.

Medeiros *et al.* (2023) em mudas de *Corymbia citriodora* submetidas a regimes de irrigação observaram redução significativa no crescimento quando cultivadas em níveis inferiores a 50% da capacidade máxima de retenção de água no solo com menores produção de biomassa.

Em mudas de *Toona cilata* Sá *et al.* (2023) observaram a partir da análise de regressão, tendência linear decrescente à medida que a tensão hídrica tornava mais negativa para a MSPA, evidenciando que a partir de -35 kPa de tensão hídrica, as mudas começam a demonstrar os efeitos negativos do déficit hídrico. Para Andrade *et al.* (2023) as mudas de *Toona cilata* mostraram-se mais sensível ao déficit hídrico, tendo em vista o rápido aparecimento de sintomas de estresse, bem como pelo baixo incremento em H e menor massa seca.

Da Silva Ribeiro *et al.* (2023) observaram reduções na biomassa de plantas de *Erythroxylum paufferrense* submetidas ao déficit hídrico, com aumento de 77,0% da MST em relação aos maiores (80% da CC) e menores (20% da CC) valores observados nos regimes hídricos.

#### **4. CONCLUSÕES**

A reposição hídrica de 70% da capacidade de campo no estabelecimento de mudas de *Acrocarpus fraxinifolius* após o plantio, promoveu maior crescimento e alterações significativas nos aspectos morfofuncionais, trocas gasosas e fluorescência da clorofila *a* permitindo maior produção de biomassa. O estresse hídrico das plantas submetidas a 30% da capacidade de campo apresentou reduções na taxa fotossintética, o que consequentemente afetou negativamente as demais variáveis morfofisiológicas.

Adubações potássicas de rustificação na produção das mudas de cedro indiano permitiram melhor estabelecimento pós-plantio, proporcionando incremento na eficiência do uso da água, taxa fotossintética, índices de clorofila e produção de biomassa, tornando importante ferramenta de manejo para plantios comerciais.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, M. M.; ALBUQUERQUE, M. B.; PEREIRA, W. E.; FELIX, V. J. L.; AZEVEDO, J. P. L. Morphophysiological evaluation of *Bauhinia divaricata* L. (Fabaceae) plants at different water regimes. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 34, n. 1, p. 120-130, dec. 2018.
- ANDRADE, R. S. de et al. Morphological and physiological variation in *Toona ciliata* under water and salinity stress. **Ciência Rural**, v. 50, n. 6, 2020. <https://doi.org/10.1590/0103-8478cr20190581>.
- ARAÚJO, G.C.R.; ALMEIDA, R.S.; VENTURIN, N.; MELO, L.A. Initial development of *Acrocarpus fraxinifolius* in function of soil preparation and phosphate mineral fertilization'. **FLORAM**, v. 29, p. 01-10, 2021.
- BENEDETTI, Vanderlei. **Nutrição e fertilização florestal [prefácio]**. Piracicaba: IPEF., 2015.
- BATTIE-LACLAU, P.; DELGADO-ROJAS, J. S.; CHRISTINA, M.; NOUVELLON, Y.; BOUILLET, J. P.; PICCOLO, M. de C.; MOREIRA, M. Z.; GONÇALVES, J. L. de M.; ROUPSARD, O.; LACLAU, J. P. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in *Eucalyptus grandis* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 364, p. 77-89, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.01.004>
- BRITO, M. E. et al. Emergence and morphophysiology of Sunki mandarin and other citrus genotypes seedlings under saline stress. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 16, n. 1, p. 1-15, 2018. <https://doi.org/10.5424/sjar/2018161-9400>.
- CALIXTO JUNIOR, J. E. D.; RIOS, J. M.; MATOS, F. S.; SILVEIRA, P. S.; BARRETO, V. C. M.; FREITAS, I. A. S.; ARAÚJO, M. S. Growth of *Khaya senegalensis* plant under water deficit. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 11, n. 18, p. 1623-1628, 2016.
- CANO, F. J., LOPEZ, R., WARREN, C. R. (2014). Implications of the mesophyll conductance to CO<sub>2</sub> for photosynthesis and water-use efficiency during long-term water stress and recovery in two contrasting *Eucalyptus* species. **Plant, Cell & Environment**, 37(11), 2470-2490. PMID:24635724. <http://dx.doi.org/10.1111/pce.12325>.
- COSTA, Andréia Mendes da. **DOSES DE URÉIA, SUPERFOSFATO TRIPLO E CLORETO DE POTÁSSIO NA PRODUÇÃO DE MUDAS E NO ESTABELECIMENTO DE PLANTAS DE *Hymenaea stigonocarpa* Mart. ex Hayne SOB RESTRIÇÃO HÍDRICA**. 2020.
- D'ÁVILA, F.S.; PAIVA, H.N.; LEITE, H.G.; BARROS, N.F.; LEITE, F.P. Efeito do potássio na fase de rustificação de mudas clonais de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 35, n. 1, p. 13-19, 2011.
- D'ODORICO, P.; PORPORATO, A.; RUNYAN, C. W. **Dryland Ecohydrology**. Cham: Springer, 2019. 602 p.

DJANAGUIRAMAN, M., BOYLE, D. L., WELTI, R., JAGADISH, S. V. K., & PRASAD, P. V. V. Decreased photosynthetic rate under high temperature in wheat is due to lipid desaturation, oxidation, acylation, and damage of organelles. **BMC plant biology**, v. 18, n. 1, p. 55, 2018.

Fernández-Crespo, E., Gómez-Pastor, R., Scalschi, L., Llorens, E., Camañes, G., García-Agustín, P., 2014. NH<sub>4</sub><sup>+</sup> induces antioxidant cellular machinery and provides resistance to salt stress in citrus plants. **Trees** 28, 1693–1704. <https://doi.org/10.1007/s00468-014-1078-y>

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, nov./dez. 2011.

FEYZIYEV, Y. M. Chlorophyll fluorescence and “maximum quantum efficiency” of photosystem II in plant sciences. **Life Sciences Biomedicine**, v. 1, n. 74, p. 18-28, jan. 2020.

FIRMINO, A.C.; MORAES, W.B.; FURTADO, E.L. Primeiro relato de *Ceratocystis fimbriata* causando seca em *Acrocarpus fraxinifolius* no Brasil. **Summa Phytopathologica**, v. 41, n. 2, p. 160, 2015.

GONÇALVES, K. S.; SOUSA, A. de P.; VELINI, E. D. Aplicação de reguladores vegetais e de fosfito de potássio em mudas de eucalipto submetidas à deficiência hídrica. **Irriga**, Botucatu, v. 20, n. 2, p. 273-285, 2015.

GROSSNICKLE, S.C.; MACDONALDS, J.E. Why seedlings grow: influence of plant attributes. **New Forests**, v.49, p.1-34, 2018.

HIGASHI, Edson Namita; DE ARRUDA SILVEIRA, Ronaldo Luiz Vaz. 5.1-FERTIRRIGAÇÃO EM VIVEIROS DE MUDAS DE *Eucalyptus* e *Pinus*. 2004.

KARGAR, M.; SURESH, R.; LEGRAND, M.; JUTRAS, P.; CLARK, O. G.; PRASHER, S. O. Reduction in water stress for tree saplings using hydrogels in soil. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, [s.l.], v. 5, n. 1, p. 27-39, jan. 2017.

LAMBERS, H.; OLIVEIRA, R. S. **Plant Physiological Ecology**. Cham: Springer, 2019. 736 p.

LIMA FILHO, P. *et al* Produção de mudas de *Ceiba speciosa* em diferentes volumes de tubetes utilizando o bio sólido como substrato. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 29, n. 1, p. 27-39, 2019.

MARTINS, G. S., FREITAS, N. C., MÁXIMO, W. P. F., & PAIVA, L. V. (2018). Gene expression in two contrasting hybrid clones of *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus urophylla* grow under water deficit conditions. **Journal of Plant Physiology**, 229, 122-131.  
Mid:30071503.<http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2018.07.007>.

MATOS, F. S., TORRES JUNIOR, H. D., ROSA, V. R., SANTOS, P. G. F., BORGES, L. F. O., RIBEIRO, R. P., NEVES, T. G., & CRUVINEL, C. K. L. (2014). **Estratégia morfofisiológica de tolerância ao déficit hídrico de mudas de pinhão manso**. *Magistra*, 26(1), 19-27. <https://doi.org/10.18671/scifor.v50.51>

MEDEIROS, D. B. et al. Physiological limitations in two sugarcane varieties under water suppression and after recovering. **Theoretical and Experimental Plant Physiology**, v. 25, n. 3, p. 213-222, 2013.

MEDEIROS, R. L. S., BORJAS-VENTURA, R. R., SOUZA, J. V. O., FERNANDES, J. P. P., GRATÃO, P. L., & PAULA, R. C. (2023). How does water deficit induce changes in primary and secondary metabolism in *Corymbia citriodora* seedlings? *Scientia Forestalis*, 51, e3911.

MEJÍA-DE TAFUR, M. S.; RIAÑO-HERRERA, N. M.; URREGO-MESA, J. B.; IBARRA-ESPINOSA, D. M.; ZAPATA-DUQUE, C. M. Effect of soil water availability on gas exchange in young trees of *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. *Acta Agronómica*, Palmira, v. 66, n. 4, p. 549-557, out. 2017.

MITTLER, R. (2017). ROS are good. **Trends in Plant Science**, 22(1), 11-19. PMID:27666517. <http://dx.doi.org/10.1016/j.tplants.2016.08.002>.

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

OJEDA, H.; RUBILAR, R. A.; MONTES, C.; CANCINO, J.; ESPINOSA, M. Leaf area and growth of Chilean radiata pine plantations after thinning across a water stress gradient. **New Zealand Journal of Forestry Science**, New York, v. 48, p. 1-11, jul. 2018.

OSAKABE, Y., OSAKABE, K., SHINOZAKI, K., & TRAN, L. S. P. (2014). Response of plants to water stress. **Frontiers in Plant Science**, 5, 86. PMID:24659993.

PEREZ, Bruna Aparecida Pereira. **Doses de potássio e umidades de solo para o crescimento de plantas de mogno-africano**. 2014. iii, 33 p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal, 2014.

PEREZ, B. A. P.; VALERI, S. V.; CRUZ, M. C. P.; VASCONCELOS, R. T. Potassium doses for African mahogany plants growth under two hydric conditions. **African Journal of Agricultural Research**, Nairobi, v. 11, n. 22, p. 1973-1979, 2016.

PIMENTEL, C.; SARR, B.; DIOUF, O.; ABOUD, A.C.S.; MACAULEY, H.R. Tolerância protoplasmática foliar à seca, em dois genótipos de caupi cultivados em campo. **Revista Universidade Rural Série Ciências da Vida**, v.22, p.07-14, 2002.

PULAVARTY, A., KUKDE, S., SHINDE, V. M., & SARANGI, B. K. (2016). Morphological, physiological and biochemical adaptations of *Eucalyptus citriodora*

seedlings under nacl stress in hydroponic conditions. **Acta Physiologiae Plantarum**, 38(1), 20. <http://dx.doi.org/10.1007/s11738-015-2042-1>.

QUEIROZ, T. B.; ROCHA, S. M. G.; FONSECA, F. S. A. da; MARTINS, E. R.; ALVARENGA, I. C. A. EFEITOS DO DÉFICIT HÍDRICO NO CULTIVO DE MUDAS DE EUCALIPTO. **IRRIGA**, [S. l.], v. 22, n. 4, p. 659–674, 2017. DOI: 10.15809/irriga.2017v22n4p659-674.

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro et al. Doses de potássio e lâminas de irrigação na qualidade de mudas de eucalipto. **Nativa**, v. 8, n. 5, p. 643-649, 2020.

RIPOLL, J., URBAN, L., BRUNEL, B., BERTIN, N. (2016). Water deficit effects on tomato quality depend on fruit developmental stage and genotype. **Journal of Plant Physiology**, 190, 26-35. PMID:26629612. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jplph.2015.10.006>.

SÁ, Larissa Campos de et al. Estresse hídrico e salino no crescimento inicial de mudas de *Toona ciliata* var. australis. **Pesquisa florestal brasileira, Colombo. Vol. 43 (2023),[art.] e202002108, 11 p., 2023.**

SCALON, Silvana de Paula Quintão et al. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciência Florestal**, v. 21, p. 655-662, 2011.

SHABALA, S. **Plant Stress Physiology**. Oxford: CAB International, 2012. 318 p.

SPADA, Grasiela et al. Qualidade de mudas de Pau-d'alho sob diferentes doses e frequências de aplicação de nutrientes. In: **Colloquium Agrariae. ISSN: 1809-8215**. 2019. p. 121-132.

SILVA, C. D., NASCIMENTO, J. S., SCARPINATI, E. A., & PAULA, R. C. (2014). Classification of Eucalyptus urograndis hybrids under different water availability based on biometric traits. **Forest Systems**, 23(2), 209-215. <http://dx.doi.org/10.5424/fs/2014232-03528>.

SILVA, Nágila Campos. **Trocas gasosas, relações hídricas e composição bioquímica em clones de eucalipto com tolerância diferencial à seca**. 2019. 42 f. Dissertação (Mestrado em Fisiologia Vegetal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2019.

SOARES, L. A. A.; FERNANDES, P. D.; LIMA, G. S.; BRITO, M. E. B.; NASCIMENTO, R.; ARRIEL, N. H. Physiology and production of naturally-colored cotton under irrigation strategies using salinized water. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 53, n. 6, p. 746-755, jun. 2018.

SOLOS, EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. **Centro Nacional de Pesquisa de Solos: Rio de Janeiro**, v. 3, 2013.

SONG, X., ZHOU, G., HE, Q., ZHOU, H. (2020). Stomatal limitations to photosynthesis and their critical Water conditions in different growth stages of maize under water stress. **Agricultural Water Management**, 241, 106330. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106330>.

SUZUKI, N., & KATANO, K. (2018). Coordination between ROS regulatory systems and other pathways under heat stress and pathogen attack. **Frontiers in Plant Science**, 9, 490. PMID:29713332. <http://dx.doi.org/10.3389/fpls.2018.00490>.

TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MØLLER, I.; MURPHY, A. **Fisiologia e Desenvolvimento Vegetal**. Porto Alegre: Artmed, 2017. 888 p.

TAIZ, Lincoln et al. **Fundamentos de Fisiologia Vegetal-6**. Artmed Editora, 2021.

TATAGIBA, S. D.; PEZZOPANE, J. E. M.; REIS, E. F. dos. Relações hídricas e trocas gasosas na seleção precoce de clones de eucalipto para ambientes com diferenciada disponibilidade de água no solo. **Revista Floresta**, Curitiba, 2008. v.38, n. 2, p 10-16.

TATAGIBA, S. D.; XAVIER, T. M. T.; TORRES, H.; PEZZOPANE, J. E. M.; CECILIO, R. A.; ZANETTI, S. S. Determinação da máxima capacidade de retenção de água no substrato para produção de mudas de eucalipto em viveiro. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 745-754, 2015.

VASQUEZ-TELLO, A.Y., ZUILY-FODIL, A.T., PHAM THI, J., VIEIRA, S. Electrolyte and Pi leakages and soluble sugar content as physiological tests for screening resistance to water stress in Phaseolus and Vigna species. **Journal of Experimental Botany**, v.41, p.827-832, 1990.

VENTURIN, N.; CARLOS, L.; SOUZA, C.P.A.; MACEDO, R.L.G.; VENTURIN, R. P.; HIGASHIKAWA, E. M. Desempenho silvicultural de *Acrocarpus fraxinifolius* Wight em função de diferentes espaçamentos e idades. **Cerne**, v. 20, n. 4, p.629-636,2014.

VITAL, Roberto Gomes. **MECANISMOS DA TOLERÂNCIA AO DÉFICIT HÍDRICO E À ALTA TEMPERATURA EM CULTIVARES DE SOJA**. 2019.

XAVIER, T. M. T., PEZZOPANE, J. E. M., PENCHEL, R. M., PEZZOPANE, J. R. M. (2019). Leaf water potential and gas exchange of eucalypt clonal seedlings to leaf solar protectant. **Journal of Forestry Research**, 30(1), 57-63. <http://dx.doi.org/10.1007/s11676-018-0602-0>.

ZEGAOU, Z.; PLANCHAIS, S.; CABASSA, C.; DJEBBAR, R.; BELBACHIR, O. A.; CAROL, P. Variation in relative water content, proline accumulation and stress gene expression in two cowpea landraces under drought. **Journal of Plant Physiology**, Bethesda, v. 218, p. 26-34, nov. 2017.

ZHANG, L., KONDO, H., KAMIKUBO, H., KATAOKA, M., & SAKAMOTO, W. VIPP1 has a disordered C-terminal tail necessary for protecting photosynthetic membranes against stress. **Plant physiology**, v. 171, n. 3, p. 1983-1995, 2016

### CONCLUSÃO GERAL

As doses de 22 g de nitrogênio e 80 g de fósforo por planta aplicadas no sulco de plantio proporcionaram melhores efeitos nas respostas morfológicas, morfoanatômicas, fisiológicas, volume de madeira, nos índices de pigmentos e teor de nutrientes das mudas de *Acrocarpus fraxinifolius*. Os resultados deste estudo, ainda, demonstraram que as plantas com adubação potássica de rustificação completa foram eficientes em mitigar os efeitos deletérios do estresse hídrico, mantendo a eficiência fotossintética e de uso da água, além da produção de biomassa das plantas. As plantas com adubação potássica de rustificação parcial proporcionou decréscimos no desempenho morfofisiológico, demonstrando ser importante utilizar a adubação de rustificação para o cedro indiano.