



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

TESE DE DOUTORADO

ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E APLICAÇÃO FOLIAR
DE PROLINA NO CULTIVO DE *Annona squamosa*

FRANCISCO ALVES DA SILVA

CAMPINA GRANDE - PB
2024

FRANCISCO ALVES DA SILVA

**ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E APLICAÇÃO FOLIAR
DE PROLINA NO CULTIVO DE *Annona squamosa***

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem, do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Orientadores:

Prof. Dr. Geovani Soares de Lima

Prof.^a Dr.^a Lauriane A. dos Anjos Soares

CAMPINA GRANDE - PB

2024

S586e

Silva, Francisco Alves da.

Estratégias de manejo de irrigação e aplicação foliar de prolina no cultivo de *Annona squamosa* / Francisco Alves da Silva. – Campina Grande, 2024.

72 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.

"Orientação: Prof. Dr. Geovani Soares de Lima, Profa. Dra. Lauriane Almeida dos Anjos Soares".

Referências.

1. Irrigação. 2. Escassez de Água. 3. Osmorregulação. 4. Fruta-pinha (*Annona squamosa* L.). 5. Aminoácido. 6. Fruticultura. I. Lima, Geovani Soares de. II. Soares, Lauriane Almeida dos Anjos. III. Título.

CDU 631.67(043)



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA AGRICOLA
Rua Aprígio Veloso, 882, - Bairro Universitário, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES

FRANCISCO ALVES DA SILVA

"ESTRATÉGIAS DE MANEJO DE IRRIGAÇÃO E APLICAÇÃO FOLIAR DE PROLINA NO CULTIVO DE *Annona squamosa*"

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola como pré-requisito para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola.

Aprovada em: 10/12/2024

Geovani Soares de Lima - Orientador(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Lauriane Almeida dos Anjos Soares - Orientador(a) - UAGRA/CCTA/UFMG

Maria Sallydelândia Sobral de Farias - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Vera Lucia Antunes de Lima - Examinador(a) Interno(a) - PPGEA/CTRN/UFMG

Reynaldo Teodoro de Fátima - Examinador(a) Externo(a) - PDPG/PPGTH/UFMG

Jackson Silva Nóbrega - Examinador(a) Externo(a) - PDJ/PPGTH/UFMG



Documento assinado eletronicamente por Jackson Silva Nóbrega, Usuário Externo, em 11/12/2024, às 10:50, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por MARIA SALLYDELANDIA DE FARIAS ARAUJO, PROFESSOR 3 GRAU, em 11/12/2024, às 11:22, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GEOVANI SOARES DE LIMA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 11:46, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **Reynaldo Teodoro de Fatima, Usuário Externo**, em 11/12/2024, às 13:43, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **LAURIANE ALMEIDA DOS ANJOS SOARES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/12/2024, às 14:51, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **VERA LUCIA ANTUNES DE LIMA, PROFESSOR 3 GRAU**, em 11/12/2024, às 20:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5050086** e o código CRC **2BFC054B**.

AGRADECIMENTOS

Ao todo poderoso meu Deus, criador do o universo, pelo dom da vida, dando-me proteção em todos os momentos.

Aos meus pais Bento Alves de Lima (*in memoriam*) e Isabel Olivia de Lima, a esposa Maria Erineide e meus filhos Goldberg e Glaudineide, ao meu irmãos José, Francisca, Gorett, Maria, Arnaldo, Olivia, Irani e Pedro e a todos os familiares por estarem a todo tempo ao meu lado e sempre incentivando nessa difícil jornada.

Ao Prof. Dr. Geovani Soares de Lima e Profa. Dra. Lauriane Almeida dos Anjos Soares, pela orientação, confiança, disponibilidade, ensinamentos, amizade e pelo exemplo transmitido, e pela oportunidade de poder trabalhar na pesquisa pelo Manejo de água, solo e planta em sistemas de produção irrigados (MASP) nesses anos de trabalho.

A todos integrantes, ex-integrantes, agregados, anexos e demais denominações do MASP. Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola (PPGA). A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela paciência, dedicação e ensinamentos disponibilizados nas aulas, cada um de forma especial contribuiu para a conclusão desse trabalho e conseqüentemente para minha formação profissional.

Aos membros da banca Examinadora Profa. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, Profa. Dra. Maria Sallydelândia de Farias Araújo, Dr. Reynaldo Teodoro de Fátima e Dr. Jackson Silva Nóbrega, pessoas que jamais esquecerei, por se disporem a colaborarem de forma grandiosa com essa pesquisa.

Aos amigos que sempre me apoiaram, não só na pesquisa, mas em todos os momentos: Em especial o 'Reynaldo Teodoro', Cassiano Lacerda, Rafaela Frazão, Smyth Totsk, Maíla Dantas, Iara Roque, Valeska Karoline, Luderlândio Andrade, Jackson Nóbrega, Jean Telvio, por todas as parcerias, experiências e aprendizados vividos ao longo dessa jornada.

A minha esposa, Maria Erineide Alves, pelo apoio, companheirismo, carinho e paciência durante todo esse tempo, te agradeço de coração! És o melhor presente que Deus me deu. Obrigado por tudo, te amo! A toda sua família por todo apoio e incentivo.

Enfim, a todos que contribuíram de forma direta ou indireta para realização do trabalho, o meu muito obrigado.

Muito obrigado!

OFEREÇO

*Ao meus pais,
Bento Alves de Lima (em memória) e Isabel Olivia de Lima*

DEDICO

*Gratidão, a minha família! que sempre me apoiou
o alicerce que sustenta minha vida
e o amor que nutri minha alma.*

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	9
LISTA DE FIGURAS	10
RESUMO	12
ABSTRACT	13
1. INTRODUÇÃO	14
2. OBJETIVOS	16
2.1. Geral	16
2.2. Específicos	16
3. REVISÃO DE LITERATURA	17
3.1 A cultura da pinheira: Aspectos botânicos, exigências edafoclimáticas e importância socioeconômica	17
3.2. Quantidade e qualidade de água irrigação	18
3.3 Prolina na atenuação do estresse hídrico	20
4. MATERIAL E MÉTODOS	22
4.1. Localização e clima	22
4.2. Delineamento experimental	23
4.3. Formação de mudas, transplântio em campo e adubação	23
4.4. Manejo dos tratamentos	27
4.5. Variáveis analisadas	29
4.6. Análise estatística	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
5.1. Fisiologia de pinheira	33
5.2. Produção total e qualidade físico-química de frutos	48
5.3. Teor foliar de nutrientes e produtividade de pinheira	55
6. CONCLUSÕES	61
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

LISTA DE TABELAS

	Pág
Tabela 1. Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento, antes da aplicação dos tratamentos.....	22
Tabela 2. Resumo da análise de variância para teor de clorofila <i>a</i> (Cl <i>a</i>), <i>b</i> (Cl <i>b</i>), total (Cl <i>t</i>), carotenoides (Car), clorofila <i>a/b</i> (Cl <i>a/b</i>), déficit de saturação hídrico (DSH), conteúdo relativo de água foliar (CRAF) e solo (CRAS), extravasamento de eletrólitos (EE), fluorescência inicial (F ₀), máxima (F _m), variável (F _v), eficiência quântica do fotossistema (F _v /F _m) e produção (Prod) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 596 dias após o transplântio (DAT).....	31
Tabela 3. Resumo da análise de variância para teores de clorofila <i>a</i> (Cl <i>a</i>), <i>b</i> (Cl <i>b</i>), total (Cl <i>t</i>), carotenoides (Car), clorofila <i>a/b</i> (Cl <i>a/b</i>), déficit de saturação hídrico (DSH), conteúdo relativo de água foliar (CRAF) e solo (CRAS), extravasamento de eletrólitos (EE), fluorescência inicial (F ₀), máxima (F _m), variável (F _v), eficiência quântica do fotossistema (F _v /F _m) e produção (Prod) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 596 dias após o transplântio (DAT).....	38
Tabela 4. Resumo da análise de variância para número de frutos (NFP), peso médio de frutos (PMF), produção total (PT), diâmetro transversal (DT) e longitudinal (DL) de frutos, número de gomos por fruto (NG), acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS), ácido ascórbico (AsA), açúcar total (A), peso de casca (PC), sementes (PS) e polpa (PP), número de sementes (NS) e rendimento de polpa (Rend) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 894 dias após o transplântio (DAT).....	46
Tabela 5. Resumo da análise de variância para teor foliar de nitrogênio (N), enxofre (S), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cloreto (Cl) e produtividade (PROD) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 894 dias após o transplântio (DAT).....	52

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Dados de temperaturas máximas e mínimas diárias, umidade relativa média do ar, radiação solar e precipitação durante o período de condução do experimento (2022/2023).....	20
Figura 2. Enchimento das sacolas e disposição das mudas de pinheira nas bancadas.....	21
Figura 3. Preparo da área, abertura de covas e transplântio das mudas de pinheira na área experimental, com sistema de irrigação já em funcionamento.....	23
Figura 4. Poda de formação e de limpeza realizada através do corte da gema apical.....	24
Figura 5. Disposição do experimento nas distintas fases de desenvolvimento das plantas.....	24
Figura 6. Teores de clorofila <i>a</i> (A) e carotenoides (B) de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 596 dias após o transplântio.....	32
Figura 7. Teores de clorofila <i>b</i> (A), relação clorofila <i>a/b</i> – Cl <i>a/b</i> (B), clorofila total – Cl t (C) e extravasamento de eletrólitos – EE (D) de pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 596 dias após o transplântio.....	33
Figura 8. Déficit de saturação hídrico de folhas - DSH de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 596 dias após o transplântio.....	36
Figura 9. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de rega – T e prolina– P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).....	37
Figura 10. Teores de clorofila <i>a</i> – Cl <i>a</i> (A) e carotenoides - Car (B) de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 894 dias após o transplântio.....	39
Figura 11. Teores de clorofila <i>b</i> – Cl <i>b</i> (A), clorofila total – Cl t (B) e extravasamento de eletrólitos - EE (C) da pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplântio.....	40
Figura 12. Déficit de saturação hídrica foliar - DSH (A), florescência máxima - Fm (B) e variável – Fv (C) da pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplântio.....	42
Figura 13. Conteúdo de água do solo em função dos turnos de irrigação, aos 894 dias após o transplântio.....	44

Figura 14. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina via foliar – P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).....	45
Figura 15. Número de frutos por planta - NFP (A) e produção total – PT de pinheira (B), em função dos turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplantio.....	47
Figura 16. Acidez titulável (A), peso de casca (B) e peso de sementes (C) em função dos turnos de irrigação e prolina via foliar, aos 894 dias após o transplantio.....	49
Figura 17. Número de sementes de pinheira, em função da aplicação de prolina, aos 894 dias após o transplantio.....	50
Figura 18. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina– P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).....	51
Figura 19. Teores foliares de nitrogênio (A) e enxofre (B) de pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplantio.....	53
Figura 20. Teores foliares de fósforo de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 894 dias após o transplantio.....	55
Figura 21. Produtividade de pinheira em função dos turnos de irrigação e prolina via foliar aos 894 dias após o transplantio.....	56
Figura 22. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina via foliar – P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).....	57

SILVA, F. A. da. **Estratégias de manejo de irrigação e aplicação foliar de prolina no cultivo de *Annona squamosa***. 2024. 72p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola – Irrigação e Drenagem). Universidade Federal de Campina Grande. Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola. Campina Grande, PB.

RESUMO

A irrigação é crucial para a fruticultura no semiárido nordestino, onde a escassez de água representa o maior desafio. Para mitigar os efeitos do déficit hídrico, é essencial adotar práticas eficazes, essas que partem do manejo da irrigação como a determinação de um turno de rega ou aplicação de elicitores, como a prolina. Neste contexto, objetivou-se avaliar os efeitos da aplicação foliar de prolina nos aspectos fisiológicos, nutrição, produção e qualidade pós-colheita de frutos de pinheira cultivada sob turnos de rega, em dois ciclos de produção no semiárido paraibano. A pesquisa foi desenvolvida na Fazenda Experimental ‘Rolando Enrique Rivas’ do Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar da Universidade Federal de Campina Grande, localizada no município de São Domingos, Paraíba. Adotou-se o delineamento em blocos casualizados, em esquema de parcelas subdivididas, sendo a parcela os quatros turnos de rega (1, 4, 8 e 12 dias) e a subparcelas as duas concentrações de prolina (0 e 10 mM), com quatro repetições e quatro plantas úteis por parcela. A irrigação com turno de rega de 12 dias resultou em alterações na fisiologia no segundo ano de cultivo da pinheira, afetando negativamente a síntese de pigmentos fotossintéticos e a fluorescência máxima. Os componentes de produção e a qualidade dos frutos de pinheira nos dois anos de cultivo foram beneficiados pelo aumento no intervalo dos turnos de irrigação. Os teores de nutrientes foliares foram alterados com turno de irrigação de 12 dias, contudo, com exceção dos teores de nitrogênio, as plantas de pinheira se encontram em níveis de suficiência nutricional. Apesar de contribuir na redução do extravasamento de eletrólitos no limbo foliar, à aplicação foliar de prolina não apresentou benefícios na fisiologia e componentes de produção de pinheira. Os turnos de irrigações de até 12 dias demonstraram eficientes para otimizar o uso da água no cultivo de pinheira no semiárido paraibano.

Palavras-chave: *Annona squamosa* L., escassez de água; osmorregulação, aminoácido

SILVA, F. A. da. **Irrigation management strategies and foliar application of proline in *Annona squamosa* cultivation.** 2024. 72p. Thesis (Doctorate in Agricultural Engineering – Irrigation and Drainage). Federal University of Campina Grande. Academic Unit of Agricultural Engineering. Campina Grande, PB.

ABSTRACT

Irrigation is crucial for fruit growing in the semiarid region of the Northeast, where water scarcity represents the greatest challenge. To mitigate the effects of water deficit, it is essential to adopt effective practices, which start with irrigation management, such as determining a watering schedule or applying elicitors, such as proline. In this context, the objective was to evaluate the effects of foliar application of proline on the physiological aspects, nutrition, production and post-harvest quality of sugarcane fruits grown under irrigation schedules, in two production cycles in the semiarid region of Paraíba. The research was developed at the 'Rolando Enrique Rivas' Experimental Farm of the Center for Agrofood Science and Technology of the Federal University of Campina Grande, located in the municipality of São Domingos, Paraíba. A randomized block design was adopted, in a split-plot scheme, with the plot having four irrigation shifts (1, 4, 8 and 12 days) and the subplots having two proline concentrations (0 and 10 mM), with four replicates and four useful plants per plot. Irrigation with a 12-day irrigation shift resulted in changes in the physiology in the second year of cultivation of the custard apple, negatively affecting the synthesis of photosynthetic pigments and maximum fluorescence. The production components and the quality of the custard apple fruits in the two years of cultivation were benefited by the increase in the interval between irrigation shifts. The foliar nutrient contents were altered with a 12-day irrigation shift; however, with the exception of nitrogen contents, the custard apple plants are at nutritional sufficiency levels. Despite contributing to the reduction of electrolyte extravasation in the leaf blade, foliar application of proline did not present benefits in the physiology and production components of pine trees. Irrigation shifts of up to 12 days proved efficient in optimizing water use in pine tree cultivation in the semiarid region of Paraíba.

Keywords: *Annona squamosa* L., water scarcity; osmoregulation, aminoacid

1. INTRODUÇÃO

A irrigação desempenha um papel fundamental no cenário socioeconômico e do agronegócio brasileiro. Seu fortalecimento pode ajudar significativamente à agricultura a contribuir de maneira mais eficaz para o desenvolvimento do país. É essencial discutir elementos básicos que defendam a irrigação e os principais benefícios de sua adoção (SIMIONATTO; CARVALHO, 2022). A fruticultura é um dos segmentos mais destacados da economia brasileira nos últimos anos, com uma ampla variedade de espécies produzidas em todo o território nacional, sob diversas condições edafoclimáticas. Entre elas, destaca-se a pinheira (*Annona squamosa* L.), uma espécie de clima tropical com grande expressão econômica em várias regiões do país (ARGENTA et al., 2019).

O cultivo comercial da pinheira no Brasil é notável tanto na produção quanto na comercialização da fruta. Segundo o Censo Agropecuário de 2017, a produção brasileira superou 8,72 mil toneladas, gerando mais de R\$ 20 milhões (IBGE, 2022). O Nordeste é responsável por cerca de 86% da produção nacional, com 89% da área colhida e 75% de toda a área produtora de pinha, com os estados da Bahia, Pernambuco, Alagoas e Rio Grande do Norte se destacam na produção (OLIVEIRA; NASCIMENTO, 2016).

Entretanto, a região semiárida do Nordeste brasileiro enfrenta a problemática da escassez hídrica, caracterizada por baixos índices pluviométricos, distribuição irregular de chuvas e altas temperaturas, resultando em uma elevada taxa de evapotranspiração durante grande parte do ano. Esse cenário torna a prática da irrigação imprescindível para manter a produção agrícola (LIMA et al., 2018). O estresse hídrico é um dos principais fatores que limitam o crescimento e a produtividade das culturas, provocando um desbalanço entre a absorção e a utilização da energia luminosa nos cloroplastos, resultando em um aumento significativo na produção de espécies reativas de oxigênio (TAIZ et al., 2017). Essas espécies causam danos celulares, como a oxidação de proteínas, lipídios e ácidos nucleicos, podendo levar à morte do tecido vegetal.

Uma estratégia eficaz para mitigar os impactos do estresse hídrico é a aplicação de prolina. Diversos estudos têm demonstrado que esse aminoácido atua como osmoprotetor, protegendo as plantas do estresse ambiental (SILVA et al., 2020a; TORRES et al., 2023). A prolina é crucial para diversos parâmetros fisiológicos, estabilizando proteínas e protegendo as membranas dos efeitos deletérios das espécies reativas de oxigênio (CACEFO, 2020). Além da aplicação foliar de prolina, outra estratégia fundamental é a

determinação do turno de rega para diferentes culturas, como a pinheira, garantindo um manejo de irrigação adequado e auxiliando na tomada de decisão sobre o momento ideal para a irrigação. Pesquisas contínuas são necessárias para fornecer informações sobre o momento adequado de realizar a irrigação, o que é crucial para o sucesso dos empreendimentos agrícolas irrigados.

Diante dessas condições, para o desenvolvimento sustentável da fruticultura na região Nordeste, é necessário adotar espécies com potencial para cultivo em sequeiro, como a pinheira. Sua produção pode ocorrer sob as condições naturais de pluviosidade do semiárido (MELO; VOLTOLINI, 2019). O ajustamento osmótico é uma das principais respostas das plantas ao estresse hídrico, correlacionado ao seu grau de tolerância. Neste mecanismo, ocorre a biossíntese e o acúmulo de solutos compatíveis no vacúolo ou no citosol, como estratégia adaptativa aos estresses (KAUR; ASTHIR, 2020).

A utilização eficiente da água é crucial para evitar sérios danos aos produtores, sejam por excesso ou escassez desse recurso. Estratégias de manejo que visem à eficiência no uso da água são indispensáveis em sistemas agrícolas em regiões com limitação hídrica. Portanto, a investigação de estratégias de manejo da irrigação associadas à aplicação foliar de prolina é vital para reduzir os impactos do estresse hídrico sobre as plantas de pinheira no semiárido nordestino.

2. OBJETIVOS

2.1. Geral

Avaliar o efeito de aplicação foliar de prolina nos aspectos fisiológicos, nutrição, componentes de produção e qualidade pós-colheita de frutos de pinheira sob estratégias de manejo de irrigação, em dois ciclos de produção no semiárido paraibano.

2.2. Específicos

Mensurar a eficiência fotoquímica e o dano celular em folhas de pinheira sob irrigação com turnos de rega e aplicação foliar de prolina;

Determinar os teores de pigmentos fotossintéticos, as relações hídricas e o potencial hídrico de pinheira cultivada sob turnos de rega e aplicação foliar de prolina;

Quantificar os teores de macronutrientes nos tecidos foliares das plantas de pinheira submetidas a turnos de rega e prolina na fase de plena floração;

Avaliar os componentes de produção e a qualidade pós-colheita dos frutos em função dos turnos de rega e aplicação foliar de prolina;

Estabelecer o turno de irrigação que favoreça a produção de pinheira no semiárido paraibano;

Analisar os efeitos da aplicação foliar de prolina no cultivo de pinheira em dois ciclos de cultivo.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 A cultura da pinheira: Aspectos botânicos, exigências edafoclimáticas e importância socioeconômica

A pinheira (*Annona Squamosa* L.) pertence à família das Anonáceas e é uma frutífera amplamente cultivada e explorada de norte a sul do Brasil, devido ao seu bom retorno econômico (SILVA et al., 2017). A colheita dos frutos começa a partir do segundo ou terceiro ano após o plantio, com a produção aumentando até atingir o máximo entre cinco a oito anos (PEREIRA et al., 2011). Morfologicamente, suas raízes são do tipo axial ou pivotante, concentrando-se nos primeiros 40 cm de profundidade do solo. Trata-se de uma planta arbórea, de caule lenhoso, bastante lignificado, com crescimento rápido e contínuo (LEMOS, 2014; BATAGLION et al., 2015).

As folhas são verde-brilhantes na face adaxial e verde-azuladas na face abaxial. As flores surgem a partir dos ramos novos e podem ser pendentes, isoladas ou em grupos de duas a quatro. As pétalas, em número de três, são lanceoladas, grossas e de corte triangular, com 1,4 cm de comprimento (FERREIRA et al., 2019). Apesar das flores serem anatomicamente perfeitas, apresentam um problema fisiológico no gineceu que dificulta à autofecundação (MODESTO JUNQUEIRA et al., 2004). Seus frutos possuem sementes longas e pretas, presas a gomos branco-amarelados de consistência viscosa e sabor adocicado, podendo ser consumida in natura (NASCIMENTO, 2012).

O fruto é do tipo climatérico e sua polpa contém compostos benéficos à saúde, incluindo vitaminas, proteínas e carboidratos, além de metabólitos secundários como compostos fenólicos, alcaloides e saponinas (BASKARAN et al., 2016). A propagação da pinheira pode ser feita de forma sexuada (sementes) ou assexuada (estaquia, mergulhia e enxertia), além do cultivo *in vitro*. A multiplicação por sementes é o método usualmente utilizado no estabelecimento de pomares comerciais (SILVA et al., 2019). Para o cultivo desta fruteira, é necessário que os solos possuam textura média e adequado teor de nutrientes.

Quanto à nutrição, a pinheira é exigente em ordem decrescente dos seguintes elementos: nitrogênio (N), potássio (K), cálcio (Ca), enxofre (S), fósforo (P), magnésio (Mg), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), boro (B), cobre (Cu), cloro (Cl) e molibdênio (Mo) (ROZANE; NATALE, 2014). Segundo Silva e Silva (1997), a

quantidade média necessária para a produção de frutos por tonelada é de 8,4 kg de N; 7,5 kg de K; 6,2 kg de Ca; 1,0 kg de S; 0,7 kg de P e 0,6 kg de Mg.

Além do valor econômico e social, o fruto é muito utilizado na alimentação humana, seja *in natura* ou processada na forma de doces, geleias, sorvetes, licores, entre outros produtos. A pinheira apresenta importantes propriedades terapêuticas e medicinais, onde suas folhas e polpa contêm substâncias como citocinas e interleucinas, sendo a última considerada um sedativo natural, além de compostos fenólicos (FERREIRA et al., 2019). Estudos recentes demonstram que a polpa da pinheira possui um alto teor de antioxidantes, que ajudam na prevenção de doenças crônicas, como doenças cardiovasculares e câncer (SANTOS et al., 2018). A fruta também é rica em fibras dietéticas, que são essenciais para a saúde digestiva e para o controle dos níveis de açúcar no sangue (LIMA et al., 2020).

3.2. Relações hídricas no semiárido

O semiárido brasileiro ocupa uma área de 982.561 km², equivalente a 18,2% do território nacional e 53% da região Nordeste, abrangendo 1.262 municípios (IBGE, 2021). Esta região é caracterizada por três tipos climáticos da classificação de Köppen: Aw, BWh e BSh (SANTOS et al., 2017). Suas peculiaridades climáticas incluem temperaturas predominantemente altas, com média anual superior a 27 °C, mínimas acima de 17 °C e máximas que podem atingir 39 °C. As variações espaciais e temporais do período chuvoso variam entre 281 a 808 mm anuais, concentradas em um curto período de três a quatro meses. Outro aspecto marcante do semiárido é o déficit hídrico, onde a evapotranspiração supera a precipitação devido à predominância de uma massa de ar quente e seco durante grande parte do ano (ARAÚJO, 2011; LUCENA et al., 2018; FERREIRA et al., 2019).

Devido à alta variabilidade de chuvas, torna-se necessária a utilização de irrigação para viabilizar a produção agrícola nesta região (SOUZA et al., 2014). Este cenário desfavorável impacta negativamente diversas culturas que possuem elevada demanda hídrica (FIOREZE et al., 2012; SILVA, 2017), exacerbando a problemática da escassez hídrica, principalmente na região Nordeste. A necessidade de uma gestão proativa que equilibre a oferta e a demanda de água é crucial para mitigar a vulnerabilidade à seca e assegurar a viabilidade da fruticultura irrigada (NUNES et al., 2020).

Plantas expostas a estresses bióticos e abióticos sofrem prejuízos significativos, afetando o desenvolvimento agrícola e a produção de alimentos (HIRAKURI, 2014). O

estresse hídrico, em particular, provoca alterações fisiológicas e morfológicas nas plantas, reduzindo sua capacidade de tolerar condições adversas (SCALON et al., 2011; DAILSON et al., 2019). No processo fotossintético, a água é essencial para a liberação de prótons e elétrons na etapa fotoquímica e para a regulação da abertura e fechamento estomático, influenciando a absorção de CO₂ e a mobilização de fotoassimilados pelas plantas (MENDES et al., 2015; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2019).

Em condições de seca, a pressão osmótica no solo devido à falta de água leva ao fechamento estomático e à interrupção do fluxo transpiratório e da fixação de carbono no ciclo de Calvin (VALE et al., 2012; FERREIRA et al., 2016; LOZANO-MONTAÑA et al., 2021). Essas alterações nas trocas gasosas resultam em dissipação irregular da energia luminosa produzida na fase fotoquímica da fotossíntese, que seria destinada à fixação do CO₂ (SANTOS; SCALON, 2020). O estresse hídrico também limita a absorção e o transporte de nutrientes nas plantas (CHAI et al., 2016; SILVA et al., 2020) devido à diminuição da mineralização dos nutrientes causada pelo baixo teor de água no solo e pela redução na transpiração devido ao fechamento estomático (TAIZ et al., 2017; BÁRZANA; CARVAJAL, 2020).

Esses efeitos fundamentam discussões sobre o impacto do estresse hídrico na morfologia e produção das plantas. ARAÚJO JÚNIOR et al. (2019) analisaram o crescimento inicial de cajueiro (*Anacardium occidentale* L.) e constataram perdas na biomassa de folhas, caule e raiz devido ao estresse hídrico. Resultados semelhantes foram observados por SOUZA et al. (2018) ao analisar o comportamento de pinheira (*Annona squamosa* L.) sob condições de estresse hídrico, com decréscimos no crescimento inicial. Estudos recentes avaliam os efeitos de diferentes regimes térmicos para identificar o grau de tolerância ao estresse hídrico e entender as interações entre disponibilidade hídrica e crescimento vegetal (FELIX et al., 2018).

A intensificação de eventos extremos, como a escassez hídrica, destaca a importância de estratégias de manejo que visem a eficiência no uso da água. O desenvolvimento e a aplicação de tecnologias de irrigação eficientes são essenciais para garantir a produção agrícola sustentável no semiárido. O uso de ferramentas de monitoramento e controle da irrigação pode auxiliar na otimização do uso da água, melhorando a eficiência hídrica e reduzindo os custos operacionais (OLIVEIRA et al., 2020).

A irrigação por gotejamento, por exemplo, é uma técnica recomendada para regiões semiáridas, pois permite a aplicação precisa de água diretamente na zona radicular das

plantas, minimizando perdas por evaporação e garantindo um uso mais eficiente do recurso hídrico (SILVA et al., 2019). Além disso, o uso de sensores de umidade do solo pode ajudar os agricultores a monitorar e ajustar a irrigação conforme as necessidades das plantas, contribuindo para a sustentabilidade dos sistemas agrícolas (ALVARES et al., 2019).

Dessa forma, a gestão eficiente da água e a adoção de tecnologias inovadoras são essenciais para garantir a sustentabilidade e a produtividade da agricultura no semiárido brasileiro. Pesquisas contínuas e o desenvolvimento de novas estratégias de manejo são fundamentais para enfrentar os desafios impostos pela escassez hídrica e promover o desenvolvimento sustentável da região.

3.3 Prolina na atenuação do estresse hídrico

A prolina é um aminoácido capaz de inibir e/ou auxiliar na indução de tolerância das plantas aos efeitos oxidativos provocados pelos estresses abióticos estabilizando a estrutura das macromoléculas e organelas. O acúmulo de prolina está associado à melhoria na tolerância das plantas submetidas ao estresse hídrico, pois pode atuar como um mecanismo regulador do déficit de água, mediante aumento da osmolaridade celular (potencial hídrico) (ALAM et al., 2016; ALVAREZ et al., 2022).

A acumulação de prolina na planta é resultado do aumento no fluxo de glutamato, que é metabolizado pela enzima Pirrolina-5-Carboxilato Sintetase (P5CS), responsável por controlar a taxa de biossíntese de prolina (GHOSH et al., 2022). Em plantas submetidas ao estresse hídrico, a prolina tem sido sugerida como um antioxidante que pode auxiliar no ajustamento osmótico, proteção da integridade celular, e na constituição de um estoque de nitrogênio (N) e carbono (C) (KISHOR et al., 2015; KHANNA-CHOPRA; KAUR, 2018).

Alguns estudos indicam uma alta correlação entre a resistência ao estresse hídrico e o acúmulo de prolina (SUEKAWA et al., 2019; TONHATI et al., 2020; SANTOS et al., 2024). São importantes alguns metabólitos secundários na determinação do nível do estresse hídrico, a prolina é um aminoácido livre que atua na redução das estruturas de membrana, aliviando as células dos efeitos negativos provocados pela escassez de água (TONHATI et al., 2020; GODAY et al., 2021).

Como apresentado por Santos et al. (2022) em que observaram que a prolina, em combinação com silício, pode restaurar o potencial da água nas folhas e aumentar a

concentração de enzimas antioxidantes, mitigando os efeitos negativos do déficit hídrico em feijão-caupi. Já Cacefo et al. (2021) observaram que a prolina altera os perfis ionômicos das folhas de tabaco, tanto transgênico quanto selvagem, sob condições de déficit hídrico, sugerindo uma melhora na tolerância ao estresse. Por fim, Soroori et al. (2021) encontraram que a aplicação foliar de prolina em *Calendula officinalis* L. sob estresse hídrico melhorou características morfológicas e fisiológicas, como altura da planta e área foliar.

Além disso, a aplicação exógena de prolina tem mostrado ser eficaz na mitigação de estresses abióticos, como observado por Tonhati et al. (2020), que demonstraram que a prolina alivia o estresse térmico em plantas de tomate cultivadas em ambiente protegido, aumentando a eficiência no uso da água e reduzindo o conteúdo de malonaldeído, um indicador de danos oxidativos. Outro estudo de Santos et al. (2024) mostraram que a aplicação foliar de prolina em mudas de maracujazeiro-azedo aumentou a altura da planta, o diâmetro do caule e a área foliar sob condições de salinidade. Isso sugere que a prolina pode ser uma ferramenta eficaz para melhorar a tolerância a estresses abióticos em culturas sensíveis.

Apesar de vários trabalhos relacionarem a função protetora da prolina na adaptação das células sob estresse osmótico, ainda existem dúvidas se o acúmulo desse composto nos tecidos das plantas proporciona vantagem adaptativa ou simplesmente uma consequência acidental de outros estresses, induzindo mudanças no metabolismo.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização e clima

A pesquisa foi conduzida no setor de fruticultura, localizado na fazenda experimental ‘Rolando Enrique Rivas Castellón’, pertencente ao Centro de Ciências e Tecnologia Agroalimentar – CCTA da Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, localizado em São Domingos, Paraíba, cujas coordenadas são: 06°48’50” de latitude (S) e 37°56’31” de longitude (W), a uma altitude de 190 m. De acordo com a classificação de Köppen, a região possui um clima do tipo Bsh (quente), caracterizado por uma temperatura média anual de 27 °C, um índice pluviométrico médio de 840 mm por ano e uma evapotranspiração anual de 1280 mm. As chuvas são predominantemente concentradas no primeiro semestre do ano, devido à atuação das frentes de convergência intertropical (ALVARES et al., 2013). As características climáticas no período de condução da pesquisa estão apresentadas na Figura 1.

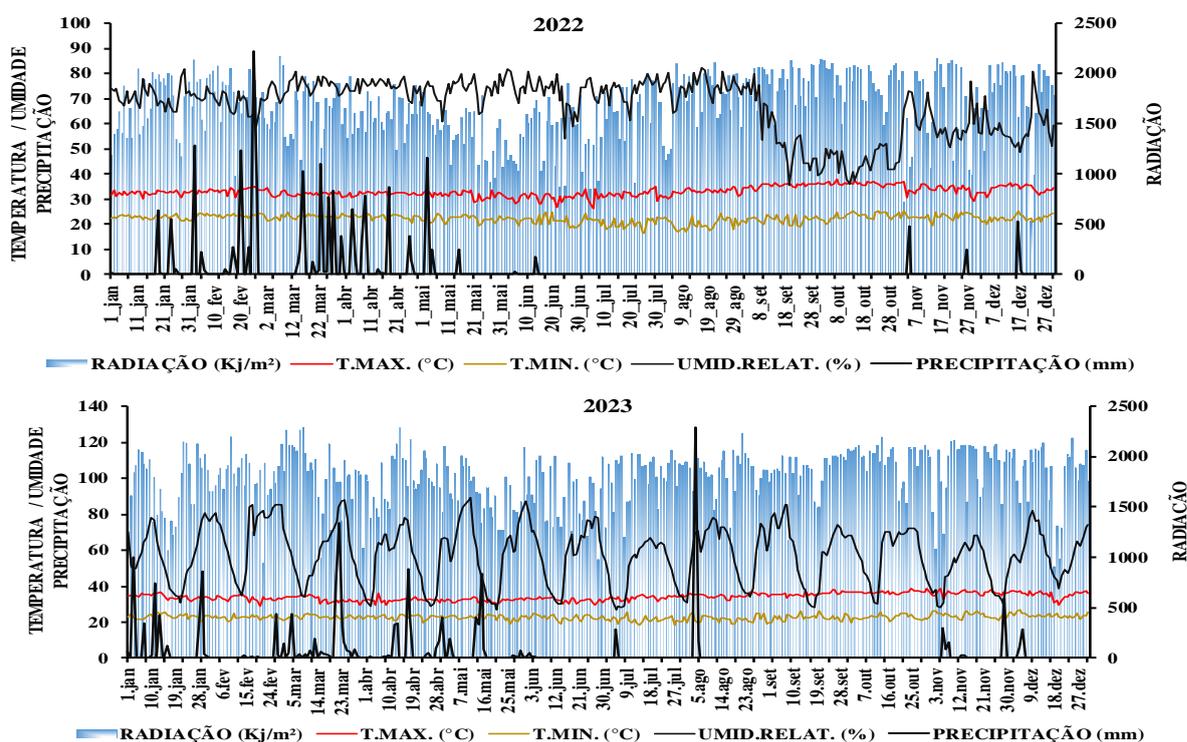


Figura 1. Dados de temperaturas máximas e mínimas diárias, umidade relativa média do ar, radiação solar e precipitação durante o período de condução do experimento (2022/2023).

4.2. Delineamento experimental

Os tratamentos foram distribuídos em blocos casualizados, em esquema de parcela subdividida, sendo as parcelas constituídas de quatro turno de rega (1, 4, 8 e 12 dias) e as subparcelas representadas por concentrações de prolina (0 e 10 mM), com quatro repetições. A parcela foi constituída de quatro plantas úteis, perfazendo um total de 128 unidades experimentais. Além disso foi utilizado fileiras externas nas parcelas (bordaduras) com o propósito de minimizar a influência entre parcelas e plantas adjacentes. As concentrações de prolina foi estabelecida baseando-se no estudo desenvolvido por Lima et al. (2016) com a cultura do pimentão.

4.3. Formação de mudas, transplântio em campo e adubação

As mudas foram produzidas sob condições de casa de vegetação na estação experimental 'Rolando Enrique Rivas Castellón', em uma estufa (Figura 2). O semeio foi realizado em sacolas plásticas de 15 × 20 cm, preenchidas com uma mistura de um Neossolo Regolítico, areia e esterco bovino curtido na proporção 84:15:1 (base volumétrica). O solo utilizado foi autoclavado para eliminar microrganismos prejudiciais. Foram semeadas duas sementes por saco e, após a emergência das plântulas, foi realizado o desbaste, deixando-se apenas a planta mais vigorosa quando atingiram 10 cm de altura. As mudas foram mantidas próximo a capacidade do recipiente, de forma manual, todos os dias com água da rede pública de São Domingos - PB.





Figura 2. Enchimento das sacolas e disposição das mudas de pinheira nas bancadas

Durante a formação das mudas, foi realizado o preparo do solo da área experimental através da aração seguida de gradagem (Figura 3A), visando o destronamento e nivelamento da área. Foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0 a 30 cm, cujas características físicas e químicas (Tabela 1) do solo foram determinadas de acordo com metodologia de Teixeira et al. (2017).

Tabela 2. Características químicas e físicas do solo utilizado no experimento, antes da aplicação dos tratamentos.

pH H ₂ O) (1:2,5)	MO g kg ⁻¹	P (mg kg ⁻¹)	Características químicas					
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Al ³⁺	H ⁺
6,67	15,60	72,30	0,17	0,10	4,37	3,70	0,48	0,04
.....Características químicas.....		Características físicas.....					
CE _{es} (dS m ⁻¹)	CTC cmol _c kg ⁻¹	RAS (mmol L ⁻¹) ^{0,5}	PST %	Fração granulométrica (g kg ⁻¹)			Umidade (dag kg ⁻¹)	
0,46	8,86	0,73	1,13	Areia	Silte	Argila	33,42 kPa ¹	1519,5 kPa ²
				758,80	197,80	43,40	13,27	4,98

pH – Potencial hidrogeniônico, MO – Matéria orgânica: Digestão Úmida Walkley-Black; Ca²⁺ e Mg²⁺ extraídos com KCl 1 M pH 7,0; Na⁺ e K⁺ extraídos utilizando-se NH₄OAc 1 M pH 7,0; Al³⁺+H⁺ extraídos utilizando-se CaOAc 0,5 M pH 7,0; CE_{es} - Condutividade elétrica do extrato de saturação; CTC - Capacidade de troca catiônica; RAS - Relação de adsorção de sódio do extrato de saturação; PST - Percentagem de sódio trocável; ^{1,2} referindo o teor de umidade no solo correspondente a capacidade de campo e ponto de murchamento permanente.

Após a preparação do solo, a área foi demarcada e as covas foram abertas com o auxílio de uma cavadeira, respeitando um espaçamento de 3 metros entre fileiras e 3 metros entre plantas. As covas mediam 40 × 40 × 40 cm (Figura 3B). Depois de abertas as covas, foi feita a adubação utilizando 10 litros de esterco bovino e 40, 60 e 60 g por planta de N, P₂O₅ e K₂O, usando como fonte a ureia, cloreto de potássio e superfosfato simples. Posteriormente foi realizada a adubação com NPK de forma quinzenal nos dois ciclos de cultivo, utilizando a proporção de 100, 80 e 40 g por planta e tendo como fontes

a ureia, o monoamônio fosfato e sulfato de potássio, conforme recomendação de Silva e Silva (1997).

O transplântio das mudas foi realizado quando as plantas estavam com altura de 50 cm. Plantas de bordadura foram cultivadas nas quatro extremidades da área, servindo como barreiras protetoras contra influências externas nos tratamentos.



Figura 3. Preparo da área, abertura de covas e transplântio das mudas de pinheira na área experimental, com sistema de irrigação já em funcionamento.

A aplicação de micronutrientes foi realizada quinzenalmente através de um composto de Dripsol micro® ($Mg^{2+} = 1,1\%$; $B = 0,85\%$; $Cu (Cu-EDTA) = 0,5\%$; $Fe (Fe-EDTA) = 3,4\%$; $Mn (Mn-EDTA) = 3,2\%$; $Mo = 0,05\%$; $Zn = 4,2\%$; contém 70% de agente quelante (EDTA) na concentração de 1 g L^{-1} , via pulverização foliar aplicando em média 40 L por aplicação.

Ao longo do experimento, foram realizadas podas de formação e frutificação, visando à padronização e adequação da cultura. A poda de formação foi realizada através do corte da gema apical quando as plantas atingiram uma altura de 40 cm, com o propósito de induzir a formação dos ramos laterais. Após a formação dos ramos laterais, foi

realizada uma nova poda, deixando-se as plantas com 4 pernas de 40 cm de comprimento (Figura 4).



Figura 4. Poda de formação e de limpeza realizada através do corte da gema apical.

As demais brotações que surgiram foram eliminadas para que a copa da planta ficasse com sua estrutura final em forma de taça, e esse procedimento foi repetido até que a planta atingisse aproximadamente 2 m de altura (Figura 5). Ao final do primeiro ano de cultivo, foi realizada uma poda de limpeza, retirando-se os ramos quebrados, mortos e doentes.



Figura 5. Disposição do experimento nas distintas fases de desenvolvimento das plantas

4.4. Manejo dos tratamentos

O sistema de irrigação adotado foi do tipo localizado por gotejamento, utilizando tubos de PVC de 32 mm na linha principal e tubos de polietileno de baixa densidade de 16 mm nas linhas laterais, equipados com gotejadores de vazão de 10 L/h. Foram instalados dois gotejadores autocompensantes (modelo GA 10 Grapa) em cada planta, posicionados a 15 cm do caule. A determinação do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) foi realizada, conforme metodologia descrita por Christiansen, (1942), para manter a homogeneidade da irrigação, conforme Eq. 1.

$$CUC = 100 \left[1 - \frac{\sum_{i=1}^n |X_i - \bar{X}|}{n \cdot \bar{X}} \right] \quad (1)$$

Em que:

X_i - vazão de cada gotejador ($L h^{-1}$);

\bar{X} - vazão média dos gotejadores ($L h^{-1}$) e; n - número de gotejadores observados.

A obtenção do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) foi determinado através da Eq. 2, de acordo com Criddle et al. (1956).

$$CUD = 100 \left(\frac{X_{25\%}}{\bar{X}} \right) \quad (2)$$

Em que:

$X_{25\%}$ - média de 25% do total de gotejadores, com as menores vazões ($L h^{-1}$) e;

\bar{X} - vazão média dos gotejadores ($L h^{-1}$).

A água utilizada na irrigação foi proveniente de poço artesiano presente na fazenda experimental, cuja condutividade elétrica no período de condução da pesquisa foi de 0,9 dS m^{-1} . As plantas foram irrigadas pela manhã, com turno de rega diário, sendo a lâmina estimada com base na ETc de acordo com Bernardo et al. (2019), utilizando-se a Eq. 3:

$$ETc = ETo \times Kc \quad (3)$$

Em que:

ETc – Evapotranspiração da cultura, $mm d^{-1}$; e

ETo – Evapotranspiração de referência, $mm d^{-1}$; e

Kc – Coeficiente de cultura.

O coeficiente de cultivo (K_c) correspondente à fase fenológica da cultura, sendo adotados K_c de 0,40, 0,50, 0,65, 0,70 e 0,60 para as fases de poda, início de brotação, florescimento, desenvolvimento de frutos e, respectivamente de acordo com o Boletim FAO 56 (ALLEN et al., 1998).

A evapotranspiração de referência (E_{To}) foi determinada diariamente a partir dos dados coletados no tanque de classe “A”. A variação do nível da água ou lâmina evaporada foi medida por meio de uma régua graduada em função da área do referido evaporímetro. A leitura do nível da água no tanque foi realizada diariamente, às 08:00 horas. A diferença entre duas leituras consecutivas resultara no valor da evaporação do período, acrescentada da precipitação, quando houver. A evapotranspiração de referência foi determinada de acordo com a metodologia de Allen et al. (1998), pela Eq. 4.

$$E_{To} = k_p \times E_v \quad (4)$$

Em que:

E_{To} = Evapotranspiração de referência (mm dia^{-1});

k_p = Coeficiente do tanque;

E_v = Evaporação do tanque Classe “A” (mm dia^{-1}).

Para a estimativa do k_p foi utilizada a Eq. 5, também proposta por Allen et al. (1998):

$$k_p = 0,108 - 0,02286 \times u_2 + 0,0422 \times \ln(B) + \ln(UR_{\text{méd}}) - 0,000631 [\ln(B)]^2 \times \ln(UR_{\text{méd}}) \dots (5)$$

Em que:

u_2 = Velocidade do vento medida a 2 m de altura (m s^{-1});

$UR_{\text{méd}}$ = Umidade relativa média (%);

B = Bordadura, em m, que corresponde o espaço entre o tanque e o final da área de contorno.

Os dados climáticos foram obtidos da Estação Meteorológica automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) localizada em São Gonçalo, no município de Sousa – PB. Nos casos de precipitação, foi contabilizado através do pluviômetro presente na área experimental e descontado o volume de água das lâminas de irrigação conforme turnos de rega.

O controle do volume de água correspondente a cada lâmina de irrigação foi realizado diariamente em horário pré-fixado de acordo com a relação da vazão dos gotejadores pelo tempo para atingir as proporções de evapotranspiração da cultura (ETc). À medida que o intervalo de tempo para atingir o volume de água de cada lâmina de irrigação foi atingido, foram realizados os sucessivos desligamentos das faixas gotejadoras.

A aplicação de prolina foi realizada após diluição de 1,1376 g/L do aminoácido em água destilada, pulverizando ambas as faces das folhas (abaxial e adaxial) até se obter o molhamento completo do limbo foliar. Utilizou-se um pulverizador costal, com um volume médio de 400 mL por planta, sendo à aplicação feita quinzenalmente às 17:00 horas. Para reduzir a tensão superficial da água, adicionou-se o produto Haiten®, um espalhante adesivo não iônico, visando melhorar a eficácia das pulverizações. Para evitar a deriva e assegurar que os demais tratamentos não fossem afetados, empregou-se lona plástica durante as aplicações.

4.5. Variáveis analisadas

4.5.1 Aspectos fisiológicos

A fisiologia das plantas de pinheira foi determinada em duas épocas de condução, sendo aos 596 DAT no segundo ano de cultivo e aos 894 DAT no terceiro ano de cultivo. Os teores de pigmentos fotossintéticos foram determinados de acordo com a metodologia de Arnon (1949), sendo determinado o conteúdo de clorofila *a*, *b* e total e de carotenoides. A extração das clorofilas foi realizada em recipientes contendo 8 ml de acetona 80% e um disco foliar com peso conhecido de área de 2,8 cm². Os quais foram mantidos no escuro e em refrigerador durante 48 horas. Os teores de clorofila e carotenoides foram determinados por meio de espectrofotômetro nos comprimentos de onda de absorbância (ABS) de 470, 647 e 663 nm, utilizando as Eqs. 5, 6, 7 e 8, sendo os valores obtidos expressos em mg g⁻¹ de matéria fresca.

$$\text{Clorofila } a \text{ (Cl } a) = (12,25 \times \text{ABS}_{663}) - (2,79 \times \text{ABS}_{647}) \quad (5)$$

$$\text{Clorofila } b \text{ (Cl } b) = (21,5 \times \text{ABS}_{647}) - (5,10 \times \text{ABS}_{663}) \quad (6)$$

$$\text{Clorofila total (Cl } t) = (7,15 \times \text{ABS}_{663}) + (18,71 \times \text{ABS}_{647}) \quad (7)$$

$$\text{Carotenóides (Car)} = ((1000 \times \text{ABS}_{470}) - (1,82 \times \text{Cl } a) - (85,02 \times \text{Cl } b))/198 \quad (8)$$

A eficiência fotoquímica das plantas foi estabelecida por meio dos índices de fluorescência da clorofila *a*, mensuradas utilizando um fluorômetro de pulso modulado, modelo OS5p da Opti Science, sendo avaliado a Fluorescência inicial (F_0), Fluorescência máxima (F_m), Fluorescência variável ($F_v = F_m - F_0$) e eficiência quântica do fotossistema II (F_v/F_m). Esse protocolo foi realizado após à adaptação das folhas ao escuro por um período de 30 minutos, utilizando pinças específicas do equipamento para garantir que todos os aceptores primários estivessem oxidados, ou seja, garantindo que os centros de reação estivessem abertos.

O extravasamento de eletrólitos no limbo foliar (EE) foi avaliado após a coleta de folhas do terço médio da planta para obtenção de 10 discos foliares de 113 mm² de área, que foram lavados com água destilada para retirar eletrólitos aderidos. Esses discos foram acondicionados em béqueres contendo 50 ml de água destilada e fechados hermeticamente com papel alumínio. Os béqueres foram mantidos à temperatura de 25 °C por 24 horas, para a medição da condutividade elétrica inicial (C_i). Posteriormente, os béqueres foram conduzidos à estufa, com ventilação forçada de ar, e submetidos à temperatura de 80 °C por 90 minutos, onde foi realizada novamente a medição da condutividade elétrica final (C_f). Desta forma, o extravasamento de eletrólitos no limbo foliar foi obtido de acordo com Scotti-Campos et al. (2013), utilizando a Eq. 9:

$$EE = \frac{C_i}{C_f} \times 100 \quad (9)$$

Em que:

EE = Extravasamento de eletrólitos (%);

C_i = condutividade elétrica inicial (dS m⁻¹);

C_f = condutividade elétrica final (dS m⁻¹).

O conteúdo relativo de água foi determinado coletando 8 discos de 113 mm² de área de folhas completamente expandidas de cada planta. Essas folhas foram pesadas em uma balança com precisão de 0,001g para obter o peso fresco das folhas (PT). Em seguida, as folhas coletadas foram imersas em água destilada por 24 horas, secas superficialmente, pesadas novamente e os valores anotados. O peso da matéria seca foi obtido após a secagem das folhas em estufa com circulação forçada de ar por um período de 48 horas. O conteúdo relativo de água (CRA) foi calculado utilizando a Eq. 10, conforme descrito por Weatherley (1950):

$$\text{CRA (\%)} = \frac{\text{PF-PS}}{\text{PT-PS}} \times 100 \quad (10)$$

Em que:

CRA – Conteúdo relativo de água;

PF, PS e PT representam, respectivamente, o peso fresco, o peso seco e o peso túrgido das folhas.

O déficit de saturação hídrica (DSH) foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Taiz et al. (2017), utilizando a Eq. 11:

$$\text{DSH (\%)} = \frac{\text{PT-PF}}{\text{PT-PS}} \times 100 \quad (11)$$

Em que:

DSH = Déficit de saturação hídrica (%); PF = peso fresco de folha (g);

PT = peso túrgido (g); PS = peso seco (g).

4.5.2 *Produção e qualidade pós-colheita*

A produção da pinheira foi avaliada com base no número de frutos por planta (NF), determinado pela contagem direta dos frutos que atingiram o estágio completo de maturação, e o peso dos frutos (PF), quantificada utilizando uma balança digital. Através dessas informações foi possível determinar a produção (Prod), em kg por planta, de cada ano de condução, bem como estabelecer a produção total (PT), em kg por planta, obtida ao final do segundo ciclo.

Com os dados de produção por planta, foi possível a determinação da produtividade, em t ha⁻¹ (PROD) de pinheira, sendo calculada multiplicando-se o valor médio obtido por planta em cada repetição pelo número de plantas correspondentes a 1 hectare, considerando-se o espaçamento adotado de 3 × 2, obteve a densidade de plantio de 1666 plantas por hectare.

A caracterização física dos frutos foi determinada pelos atributos externos: diâmetro equatorial (DE), diâmetro longitudinal (DL) e espessura da casca (EC), utilizando um paquímetro digital; e peso da casca (PC), utilizando uma balança analítica. Os atributos internos incluíram o número de sementes por fruto (NS) e o peso de sementes por fruto (PS), determinados por contagem direta e medição em balança analítica, respectivamente. Além disso, foi calculado o rendimento em polpa (Rend) pela relação entre a massa total e a massa da casca dos frutos.

A caracterização físico-química dos frutos foi obtida pelos parâmetros de sólidos solúveis (SS), determinados em um refratômetro digital portátil da marca Atago, modelo PAL-1; acidez titulável -AT (%), quantificada por titulometria com NaOH 0,1N, conforme Brasil (2005); e relação sólidos solúveis/acidez titulável (ratio), obtida pela razão entre o teor de sólidos solúveis e a acidez total titulável. O potencial hidrogeniônico (pH) foi determinado por leitura direta em potenciômetro modelo pH-1900, calibrado a cada utilização com soluções tampão de pH 4,0 e 7,0, conforme metodologia proposta pela AOAC (2005). O teor de ácido ascórbico (AsA) foi determinado por titulometria com solução de DFI (2,6 diclorofenolindofenol), seguindo a metodologia proposta por Strohecker e Henning (1967).

5.4.3 Produtividade e nutrição

Na fase de pré-floração, foram coletadas folhas de pinheira para avaliação da composição mineral. Selecionaram-se folhas saudáveis do terço médio para determinar os teores de nitrogênio (N), fósforo (P), potássio (K), enxofre (S), sódio (Na) e cloreto (Cl), expressos em g kg⁻¹. As folhas foram acondicionadas em sacos de papel do tipo Kraft e secas em estufa com circulação de ar a 65 °C até atingirem peso constante. Em seguida, as amostras foram moídas em moinho de facas tipo Willye. A determinação dos elementos minerais seguiu a metodologia de Silva (1999), utilizando digestão nítrica (P, Na, K, S) e sulfúrica (N). Os teores de sódio e potássio foram obtidos por fotometria de chama, enquanto o fósforo foi medido pelo método colorimétrico do molibdato-vanadato, utilizando um espectrofotômetro.

4.6. Análise estatística

Os dados obtidos foram avaliados através de análise de variância pelo teste F, após a realização do teste de normalidade (teste de Shapiro-Wilk) e verificação de homogeneidade dos dados. Nos casos em que houve efeito significativo para os fatores ($p \leq 0,05$), foi aplicado o teste Tukey para comparações múltiplas dos turnos de rega e o teste F para as concentrações de prolina. As análises foram realizadas utilizando o software estatístico SISVAR ESAL (FERREIRA, 2019). A análise de componente principal foi empregada para analisar a correlação entre as variáveis, utilizando o programa estatístico R.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Fisiologia de pinheira

5.1.1 Primeiro ano de cultivo

Conforme o resumo de análise de variância (Tabela 2), nota-se efeito significativo para a interação dos fatores para os teores de clorofila *b* (Cl *b*), total (Cl t) e relação clorofila *a/b* (Cl *a/b*), além do extravasamento de eletrólitos (EE). De forma isolada, o fator turnos de irrigação apresentou efeito para a clorofila *a* (Cl *a*), carotenoides (Car) e déficit de saturação hídrico (DSH). Para as demais variáveis não foram observados efeitos significativos das fontes de variação testadas.

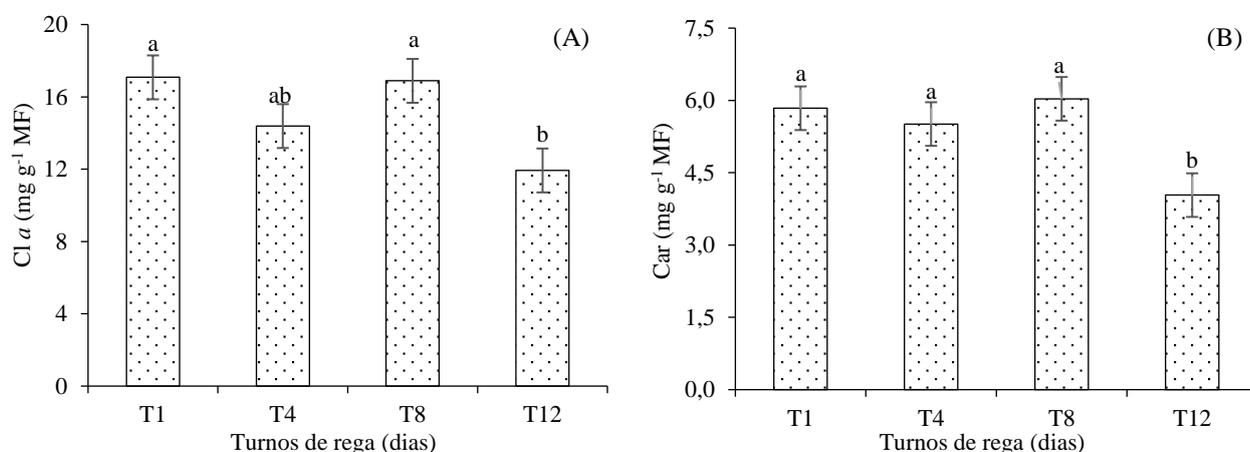
Tabela 2. Resumo da análise de variância para teor de clorofila *a* (Cl *a*), *b* (Cl *b*), total (Cl t), carotenoides (Car), clorofila *a/b* (Cl *a/b*), déficit de saturação hídrico (DSH), conteúdo relativo de água foliar (CRAF) e solo (CRAS), extravasamento de eletrólitos (EE), fluorescência inicial (F_0), máxima (F_m), variável (F_v), eficiência quântica do fotossistema (F_v/F_m) e produção (Prod) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 596 dias após o transplântio (DAT).

Variáveis	Quadrado médio								
	Turnos (T)	Prolina (P)	T × P	Bloco	Erro 1	Erro 2	CV1 (%)	CV2 (%)	Média
Cl <i>a</i>	47,13**	2,74 ^{ns}	8,52 ^{ns}	0,61 ^{ns}	5,94	3,37	16,17	12,18	15,07
Cl <i>b</i>	1,46 ^{ns}	0,35 ^{ns}	2,39**	0,13 ^{ns}	0,50	0,21	18,73	12,29	3,77
Cl t	59,60*	1,14 ^{ns}	15,60*	0,58 ^{ns}	8,80	4,48	15,74	11,23	18,84
Car	6,55**	0,12 ^{ns}	0,37 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,39	0,40	11,71	11,96	5,35
Cl	1,19*	0,55*	1,52**	0,10 ^{ns}	0,17	0,10	10,29	7,77	4,07
DSH	65,64**	4,68 ^{ns}	12,68 ^{ns}	3,73 ^{ns}	3,32	13,08	5,81	11,52	31,39
CRAF	0,21 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,46 ^{ns}	0,13	0,30	8,46	12,74	4,28
CRAS	85,41 ^{ns}	62,69 ^{ns}	3,72 ^{ns}	48,50 ^{ns}	41,00	6,40	25,91	10,24	24,71
EE	61,57 ^{ns}	240,90**	125,54**	44,46 ^{ns}	22,69	4,52	23,86	10,66	19,97
F_0	2328,09 ^{ns}	2945,28 ^{ns}	1246,34 ^{ns}	5599,80 ^{ns}	5230,95	3449,01	12,80	10,40	564,90
F_m	44624,47 ^{ns}	52690,69 ^{ns}	93483,99 ^{ns}	86061,42 ^{ns}	64046,44	78935,32	11,31	12,55	2237,98
F_v	27075,97 ^{ns}	30721,00 ^{ns}	78867,90 ^{ns}	73578,34 ^{ns}	46174,12	60186,28	12,84	14,66	1673,08
F_v/F_m	3,60e ^{-5ns}	3,00e ^{-6ns}	0,0016 ^{ns}	0,0024 ^{ns}	0,0017	0,0015	3,70	3,50	0,75
Prod	5,52 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,12 ^{ns}	1,06	0,57	20,07	16,79	3,62
GL	3	1	3	3	9	12	-	-	-

^{ns}, **, * respectivamente não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$

Os turnos de rega mostraram que os teores de clorofila *a* apresentaram o menor valor no T12 (Figura 6A), com redução de 30,15 e 29,37% em relação ao T1 e T8, respectivamente. De forma similar, os teores de carotenoides apresentaram o menor valor (4,04 mg g⁻¹ MF), nas plantas sob T12 (Figura 6B), com perdas de 30,82, 26,68 e 33,00% em comparação aos valores obtidos no T1, T4 e T8, respectivamente. Esses efeitos são comumente observados em plantas sob condições de déficit hídrico, onde a falta de manutenção do potencial hídrico pela planta aumenta a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs), levando ao aumento da produção da enzima clorofilase, que reduz a síntese de clorofilas (KHANNA-CHOPRA; KAUR, 2018; ZHANG et al., 2019).

De forma similar, os carotenoides, que normalmente têm sua produção elevada sob estresse, atuam como dissipadores de energia luminosa na forma de calor (LIU et al., 2020; WANG et al., 2021), o que pode estar relacionado à condição de 12 dias sem irrigação ocasionar desequilíbrio metabólico nas plantas, em vista à condição de semiárido onde a pesquisa é desenvolvida, agravando a manutenção da síntese na planta (POGGIOLESI et al., 2016; HAPP-KURZ, 2020).



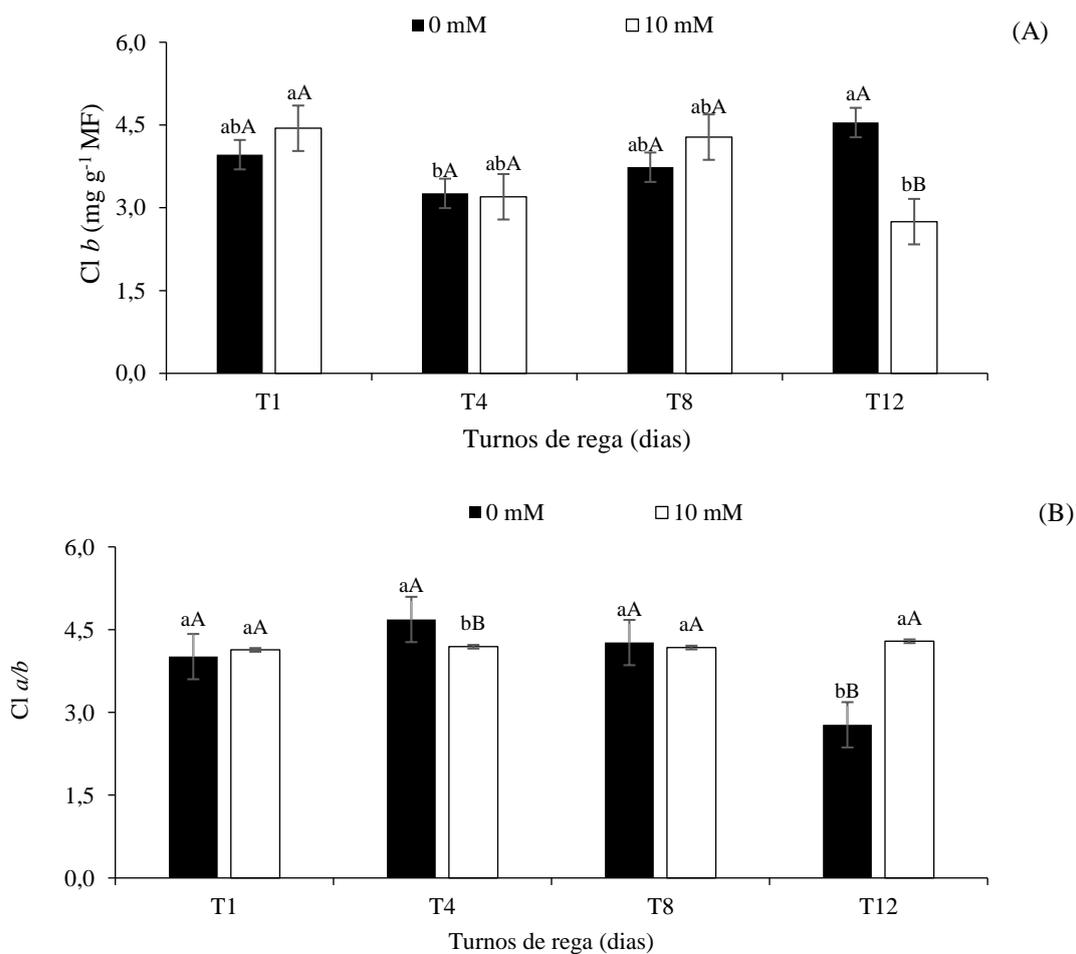
Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

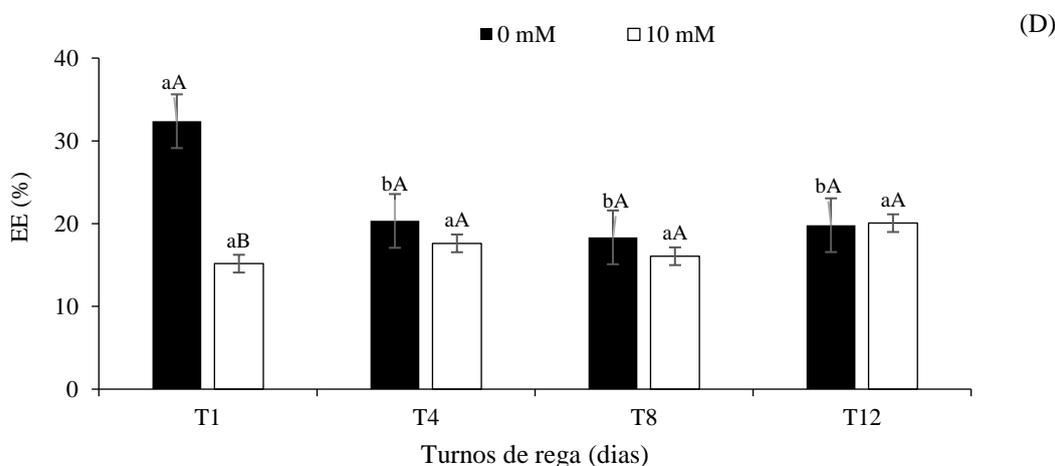
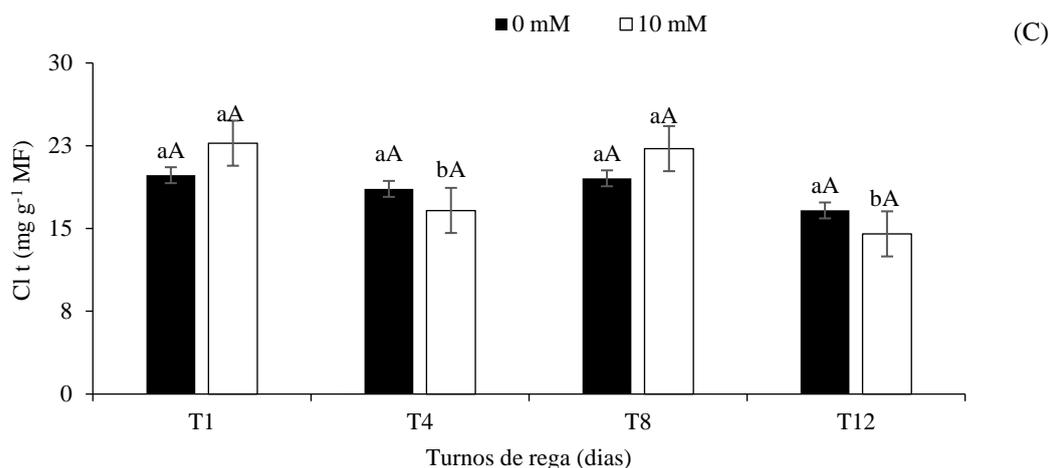
Figura 6. Teores de clorofila *a* (A) e carotenoides (B) de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 596 dias após o transplante.

Os teores de clorofila *b* das plantas de pinheira sem aplicação de prolina apresentaram uma baixa influência do aumento dos turnos de rega de até 8 dias (Figura 7A), sendo o maior valor (4,55 mg g⁻¹ MF) estabelecido nas plantas sob T12, 35,25% superior ao obtido nas plantas sob T4 (3,26). Diferentemente, as plantas sob aplicação de

prolina apresentaram os menores valores no turno de rega de 12 dias (2,75 mg g⁻¹ MF), com perdas de 39,56% em relação às plantas sem aplicação de prolina (0 mM). Além disso, mesmo o maior valor de Cl *b* das plantas sob aplicação de prolina sendo observado no turno de irrigação de 1 dia, não foram observadas diferenças significativas em relação às plantas sem aplicação de prolina, comportamento similar ao observado nos turnos de irrigação de 4 e 8 dias.

Isso demonstra uma resposta distinta aos teores de clorofila *a*, em vista que sua síntese sob estresse normalmente é inferior, pois a clorofila *b* se origina pela conversão da clorofila *a* pela atividade da enzima clorofilase oxigenase, que é destinada a elevar o comprimento de onda de absorção de luz (KHANNA-CHOPRA; KAUR, 2018). Porém, essa resposta já foi observada por Zhang et al. (2019) e Liu et al. (2020), os quais atrelaram a resposta às condições de déficit hídrico e estresse térmico, respectivamente.





Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 7. Teores de clorofila *b* (A), relação clorofila *a/b* – Cl *a/b* (B), clorofila total – Cl t (C) e extravasamento de eletrólitos – EE (D) de pinheira, em função da interação entre os turnos de e prolina, aos 596 dias após o transplântio.

Tal comportamento favorece à alteração observada na relação entre clorofila *a/b* pelo T12 nas plantas sem aplicação de prolina (Figura 7B), com perda de 30,67% em relação ao T1. Diferindo do observado nas plantas com aplicação de prolina que não apresentou diferença significativa na relação Cl *a/b* nos turnos de irrigação avaliado, com valor 54,32% superior no T12 em relação as plantas sem aplicação de prolina. Vale destacar que no T4 as plantas sem (4,68) e com (4,19) aplicação de prolina apresentaram diferença 10,47% na relação Cl *a/b*. No entanto, mesmo o menor valor observado se

encontra na relação 3:1 de Cl *a/b*, essa considerada a ideal para a manutenção da atividade fotoquímica da planta (LICHTENTHALER & BABANI, 2022).

Para os teores de clorofila total (Figura 7C), os turnos de irrigação não proporcionaram diferenças significativas nas plantas sem aplicação de prolina, comportamento similar ao obtido nas plantas com e sem aplicação de prolina. Contudo, as plantas que apresentaram aplicação de 10 mM de prolina não se diferenciaram do observado nas plantas sem prolina, sendo que em relação às estratégias observadas, os maiores valores foram estabelecidos nas plantas sob T1 e T8, com ganhos de 36,60% e 33,65% em relação às plantas sob T4 e 56,65% e 53,27% em relação ao T12, respectivamente.

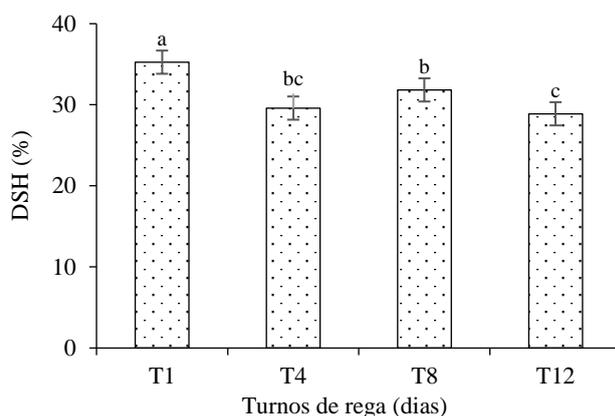
Desta forma, a manutenção dos teores de clorofila total corrobora com a falta de efeito na fluorescência da clorofila, pois a conversão de energia para a atividade fotoquímica se relaciona à captação de energia proveniente das clorofilas (KHANNA-CHOPRA; KAUR, 2018; ZHANG et al., 2019; LIU et al., 2020). Essa relação é fundamental para a eficiência da fotossíntese, como indicado por Sánchez-Moreiras et al. (2020), que destacam a importância da manutenção da eficiência quântica do fotossistema II (Fv/Fm) na captação de energia.

O maior extravasamento de eletrólitos no limbo foliar da pinheira foi de 32,37% obtido nas plantas sem aplicação de prolina e T1 (Figura 7D), valor esse que foi reduzido para 15,16% nas plantas com aplicação de prolina. Sendo que para os demais turnos de rega não se observou diferença significativa nas plantas com e sem aplicação de prolina. Desta forma, em vista a manutenção apresentada nos pigmentos e fluorescência da clorofila, a redução no EE pelo aumento nos turnos de irrigação pode estar relacionada ao aumento ao metabolismo secundário, aumentando produção de osmólitos e a defesa antioxidante, como forma de equilibrar o fluxo de solutos no xilema e o controle de EROs produzidos na captação de energia fotoquímica (ZULFIQAR et al., 2020).

Portanto, plantas submetidas a períodos de déficit hídrico produzem metabolitos suficientes para estabelecer a defesa ao estresse, enquanto à aplicação de prolina exógena contribuiu para esse efeito apenas nas plantas sob irrigação constante, o que se torna condizente com a condição de estresse térmico induzido na região de estudo (ABDALLA et al., 2020), ao ponto que as plantas mantidas sob irrigação constante induziram uma resposta menos eficiente no controle EROs produzido (HOSSAIN et al., 2022).

O déficit de saturação hídrica apresentou o maior valor nas plantas sob T1 (Figura 8), com valor de 35,26%, seguido pelo T3 que apresentou uma redução de 9,73% ao maior

valor apresentado. O menor DSH foi encontrado nas plantas sob T12, com valor (28,89%), inferior em 18,06% ao T1. Fato que corrobora com o observado na presente pesquisa, pois a falta de efeitos danosos nos aspectos fotoquímicos sugere uma manutenção do fluxo hídrico, essa que além da atividade metabólica pode ser alcançada pelo crescimento radicular, que se expande como forma de manter a assimilação de solutos do solo (KOU et al., 2022; COHEN-HOCH et al., 2024).



Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 8. Déficit de saturação hídrico foliar - DSH de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 596 dias após o transplantio.

A análise de componente principal foi estabelecida em dois eixos, onde juntos representam 79,2% da variação apresentada nas variáveis do primeiro ciclo (Figura 9). O PC1 representa 45% da variação presente, sendo o destaque a relação positiva entre as clorofilas (Cl *a*, $r = 0,92$; Cl *b*, $r = 0,55$; Cl *t*, $r = 0,92$), carotenoides (Car, $r = 0,79$) e ao déficit de saturação hídrica (DSH, $r = 0,82$), comportamento favorecido pelos tratamentos no grupo 1, a qual é inversamente proporcional ao conteúdo relativo de água (CRA, $r = -0,51$), esse representando pelos tratamentos do grupo 3 e 4, seguido pelo grupo 2.

Para o componente 2, observa-se uma representação de 34,22%, sendo constatado correlação positiva entre as variáveis de fluorescência (F_0 , $r = 0,88$; F_m , $r = 0,88$; F_v , $r = 0,86$ e F_v/F_m , $r = 0,71$), com a maior influência estabelecida pelos tratamentos do grupo 4. Vale destacar que o grupo 2 representado pelo tratamento sob T4 e sem prolina não estabelece influência marcante entre as variáveis testadas.

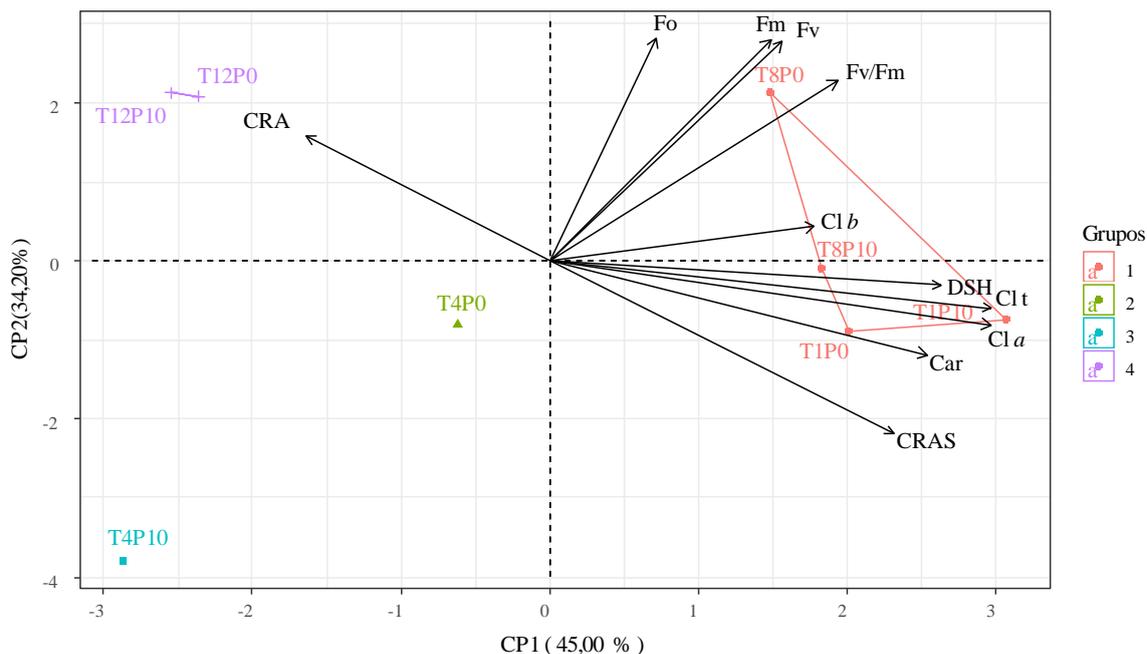


Figura 9. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de rega – T e prolina– P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).

Dessa forma, fica evidente que a condição de déficit hídrico proveniente do T12 já estabelece alterações no comportamento fisiológico das plantas, mantendo o foco na manutenção do fluxo hídrico e a atividade fotoquímica da planta, mesmo que reduzindo a síntese de clorofilas, além de ressaltar a falta de repostas pela aplicação de prolina, que mantem o comportamento similar ao estabelecido nas plantas sem aplicação de prolina.

Segundo ano de cultivo

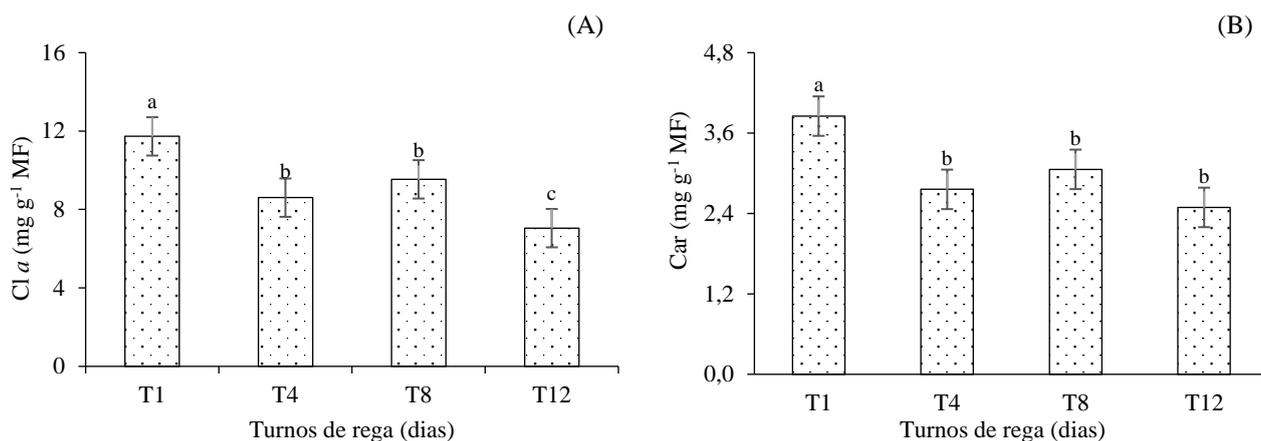
O resumo de análise de variância (Tabela 3) apresenta efeito significativo para a interação entre turnos de rega × prolina nas variáveis de teor de clorofila *b* (Cl *b*), total (Cl *t*), extravasamento de eletrólitos (EE), fluorescência máxima (Fm) e variável (Fv). O efeito isolado dos turnos de irrigação foi significativo para os teores de clorofila *a* (Cl *a*), carotenoides (Car) e conteúdo relativo de água do solo (CRAS). Enquanto para as demais variáveis não foram estabelecidos efeitos significativos dos fatores estudados.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para teores de clorofila *a* (Cl *a*), *b* (Cl *b*), total (Cl *t*), carotenoides (Car), clorofila *a/b* (Cl *a/b*), déficit de saturação hídrico (DSH), conteúdo relativo de água foliar (CRAF) e solo (CRAS), extravasamento de eletrólitos (EE), fluorescência inicial (F_0), máxima (F_m), variável (F_v), eficiência quântica do fotossistema (F_v/F_m) e produção (Prod) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 894 dias após o transplântio (DAT).

Variáveis	Quadrado médio								
	Turnos (T)	Prolina (P)	T × P	Bloco	Erro 1	Erro 2	CV1 (%)	CV2 (%)	Média
Cl <i>a</i>	30,62**	4,76 ^{ns}	1,22 ^{ns}	1,63 ^{ns}	0,72	2,84	9,18	18,27	9,23
Cl <i>b</i>	2,57**	0,17 ^{ns}	1,10**	0,31 ^{ns}	0,10	0,13	14,60	16,81	2,15
Cl <i>t</i>	40,76**	10,58 ^{ns}	11,43*	4,33 ^{ns}	2,66	2,78	14,31	14,63	11,39
Car	2,78**	0,73 ^{ns}	0,68 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,18	0,26	13,90	16,87	3,04
Cl <i>a/b</i>	1,03 ^{ns}	1,86 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,30	0,37	12,25	13,74	4,46
DSH	23,19 ^{ns}	18,16 ^{ns}	46,96**	1,95 ^{ns}	20,92	5,08	12,27	6,05	37,27
CRAF	0,15 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,16 ^{ns}	0,42 ^{ns}	0,39	0,20	14,92	10,50	4,21
CRAS	104,17**	15,88 ^{ns}	12,31 ^{ns}	5,94	7,99	5,05	20,19	16,06	14,00
EE	29,73 ^{ns}	148,74**	123,31**	13,03 ^{ns}	12,75	7,67	14,65	11,36	24,37
F_0	107,54 ^{ns}	6,12 ^{ns}	34,70 ^{ns}	38,46 ^{ns}	19,09	20,56	6,65	4,31	105,31
F_m	3590,45 ^{ns}	1188,28 ^{ns}	6354,53*	2221,78 ^{ns}	2627,75	1438,47	10,20	7,55	502,53
F_v	2566,45 ^{ns}	1365,03 ^{ns}	5526,95*	2071,61 ^{ns}	2390,59	1356,05	12,30	9,26	397,47
F_v/F_m	4,10e ^{-5ns}	4,65 ^{-4ns}	6,54 ^{-4ns}	4,50 ^{-4ns}	5,12	6,54	2,87	2,44	0,79
Prod	1,39 ^{ns}	3,15 ^{ns}	1,81 ^{ns}	2,30 ^{ns}	0,67	1,05	19,59	25,45	3,48
GL	3	1	3	3	9	12	-	-	-

^{ns}, **, * respectivamente não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$

O aumento no intervalo entre os turnos de irrigação se demonstrou prejudicial para síntese de clorofila *a* no segundo ano de cultivo da pinheira (Figura 10A), sendo o maior valor obtido nas plantas mantidas no T1 (11,73 mg g⁻¹ MF), seguida pelo T4 e T8, que já apresentam redução de 26,68 e 18,75%, porém o menor valor sendo estabelecido no T12 (7,05 mg g⁻¹ MF), com perda de 39,90% na síntese de clorofila *a* em relação ao maior valor obtido. Desta forma, danos mais severos são estabelecidos na síntese de clorofilas pela condição de déficit hídrico prolongado, atrelando assim a condição climática vigente próximo ao período de avaliação, alcançando temperaturas que superam os 36 °C e umidade relativa inferior a 50%, agravando o dano oxidativo advindo da captação excessiva de fótons sem a devida manutenção da atividade bioquímica da fotossíntese (PÉREZ-ALVAREZ et al., 2021; CHAUDHRY; SIDHU, 2022).



Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

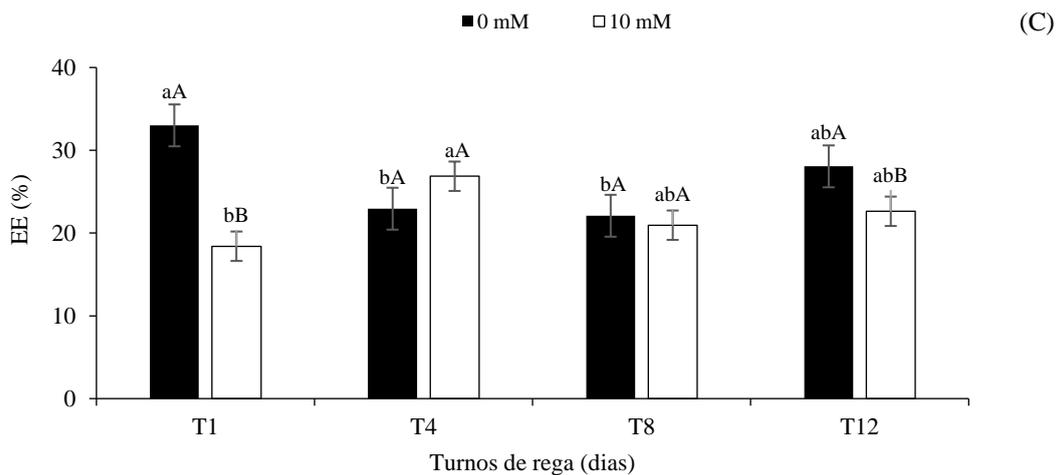
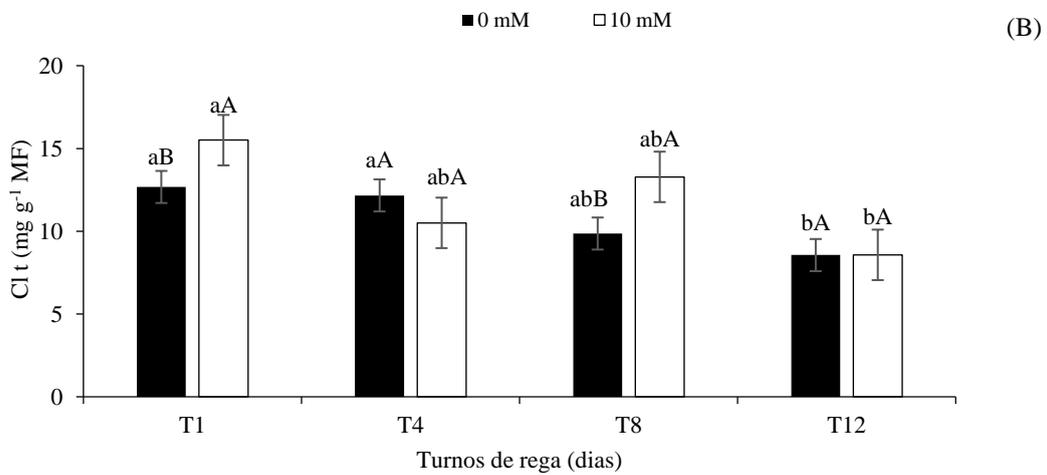
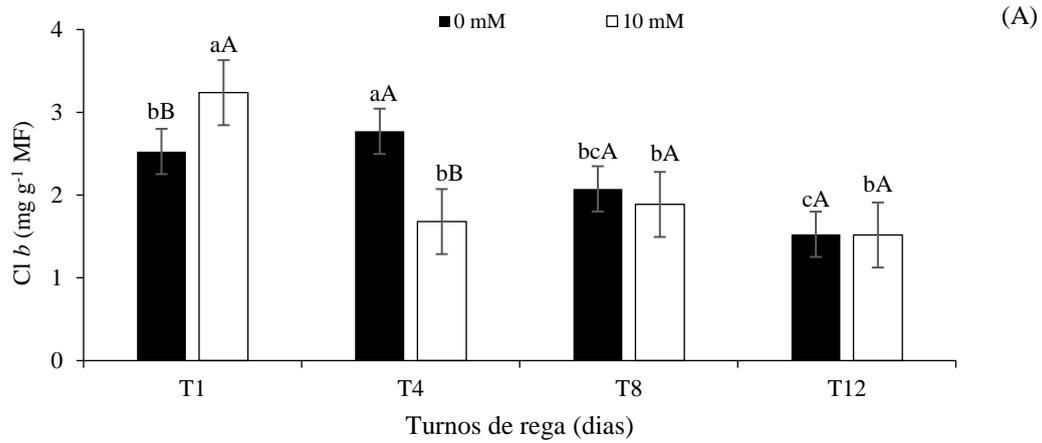
Figura 10. Teores de clorofila *a* – Cl *a* (A) e carotenoides - Car (B) de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 894 dias após o transplântio.

Os maiores danos à clorofila *a* estão associados à redução dos carotenoides, devido aos turnos de irrigação (Figura 10B). Os maiores teores de carotenoides foram observados nas plantas sob irrigação diária (3,85 mg g⁻¹ MF), com perdas de 28,31; 20,51 e 35,32% com o aumento dos intervalos dos turnos de rega, respectivamente, porém sem diferença significativa entre os demais turnos de irrigação. Dessa forma, a dissipação de energia na forma de calor é comprometida, levando a impactos mais severos devido ao acúmulo de energia na membrana dos cloroplastos (BASSI; DALL'OSTO, 2021).

Os teores de clorofila *b* foliar sob turno de irrigação de 4 dias apresenta o maior valor (2,77 mg g⁻¹ MF), superior em 24,64 e 81,04% ao obtido nas plantas sob T8 e T12, porém sem se diferenças das plantas sob irrigação diária (2,53 mg g⁻¹ MF) (Figura 11A). Diferença nos teores de Cl *b* em relação as plantas sob T1 foi obtida apenas no T12, que apresentou redução de 39,52%. Com à aplicação de prolina, ganhos nos teores de Cl *b* foram observados apenas no T1, que resultou no aumento de 28,06% em relação as plantas sem aplicação, resultando no maior valor dentre os turnos. Enquanto perdas foram obtidas no T4, que apresentou redução de 39,35% ao aplicar prolina na concentração de 10 mM. Nos demais turnos não foram observadas diferenças significativas.

Desta forma, em vista a falta de efeito na relação Cl *a/b*, nota-se que redução nos teores de clorofila *b* corrobora com o obtido na Cl *a*, como uma estratégia da planta em reduzir a captação de energia e evitar a fotodegradação (ALEMU, 2020). Fato esse favorecido pela aplicação de prolina nas plantas sob turnos de irrigação de 4 dias, como

forma e evitar o dano oxidativo, em vista que seu aumento no T1 se associa a manutenção do potencial hídrico da planta nessa condição (SIDDIQUE et al., 2018).



Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 11. Teores de clorofila *b* – Cl *b* (A), clorofila total – Cl *t* (B) e extravasamento de eletrólitos - EE (C) da pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplântio.

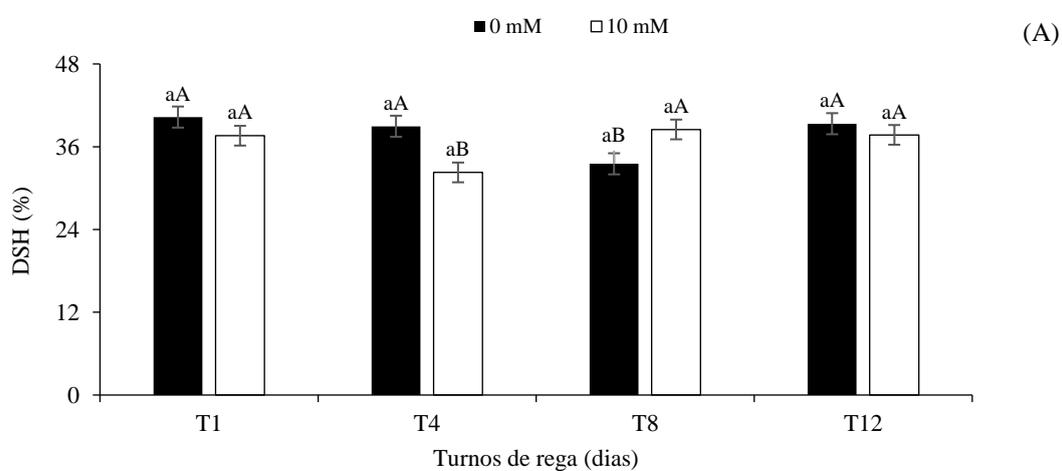
Para os teores de clorofila total (Figura 11B), perdas significativas em relação a T1 foram obtidas apenas na T12, com redução de 32,49%. Já nas plantas sob aplicação de prolina, diferença em relação ao obtido nas plantas sem aplicação foi estabelecida em T1 e T8, com o respectivo acréscimo de 22,24 e 34,68% em função da aplicação de 10 mM de prolina. O maior valor de Cl *t* foi estabelecido na T1 (15,50 mg g⁻¹ MF), que apresentou 47,48 e 80,86% superior ao estabelecido no T4 e T12. Para o T8, mesmo não diferenciando da T1, apresentou maior teor de Cl *t* apenas em relação a T12, com aumento de 54,96%. Corroborando a tendência observada no primeiro ano de cultivo, o turno de irrigação de 12 dias tende a equilibrar à atividade metabólica e fotossintética através da manutenção do potencial hídrico na planta, em vista à falta de efeito observado para o conteúdo relativo de água. Conforme Ahmad et al. (2018), perdas nos teores de clorofila total em plantas sob déficit hídrico podem ser um indicativo de aclimação ao ambiente, pois reduzindo as clorofilas evita os efeitos da fotoinibição, sobretudo em regiões de clima semiárido.

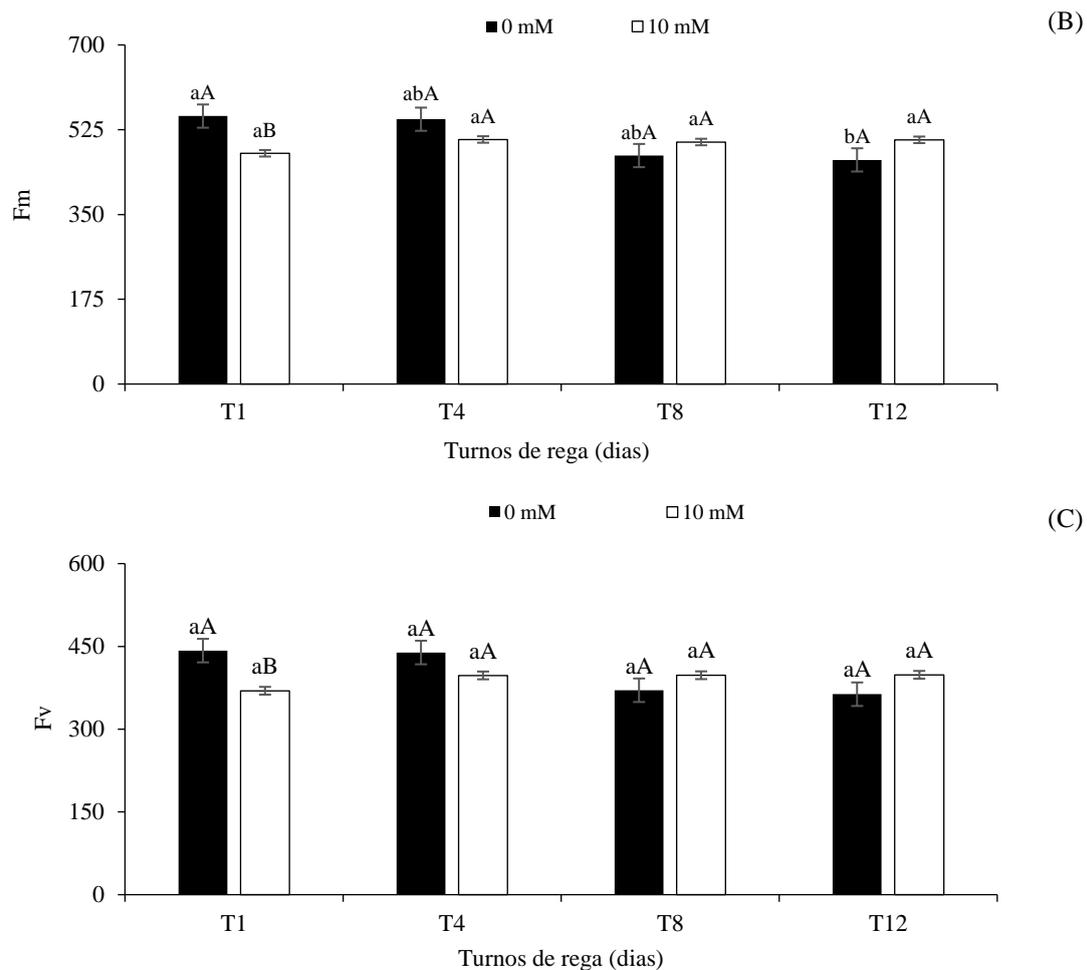
O extravasamento de eletrólitos nas plantas sem aplicação de prolina apresenta os maiores valores na T1 (33,01%), sem diferença significativa em relação ao observado na T12 (28,06%). Observa-se, entretanto, um decréscimo nos demais turnos de irrigação, com o T4 e o T8 apresentando reduções de 30,50% e 33,08% em comparação à T1, respectivamente (Figura 11C). A aplicação de prolina contribuiu para reduzir o EE nas plantas de pinheira sob T1 e T12, resultando em uma diminuição de 44,23% e 19,35%, respectivamente. Este comportamento estabeleceu as plantas do T1 como tendo o menor valor de EE (18,41%) entre os turnos de irrigação com aplicação de prolina, diferenciando-se em 28,86% em relação ao T4 (26,86%). Dessa forma, o extravasamento de eletrólitos ainda se mantém em valores considerados aceitáveis, mas observa-se um efeito mais danoso em plantas não submetidas a turnos prolongados de falta de irrigação, provavelmente devido ao processo de aclimação que as plantas apresentam até certo nível de déficit hídrico.

Ghafari et al. (2020) relata que períodos de déficit hídrico prolongado em macieira (*Malus domestica*) impulsionou à atividade de antioxidantes como catalase (CAT), superóxido dismutase (SOD), peroxidase ácida ascorbática (APX) e fenilalanina amônia-

liase (PAL), responsável pela produção de compostos fenólicos, prevenindo danos fotoquímicos. Além disso, a redução no extravasamento de eletrólitos advinda da aplicação de prolina, está associado a proteção que essa substância ocasiona na membrana celular a peroxidação lipídica, tendo em vista a interação que apresenta com os fosfolipídios, ajudando a manter a integridade estrutural das células (KISHOR et al., 2015; RAWAT et al., 2021).

O déficit de saturação hídrica das plantas sem aplicação de prolina foi alterado apenas no T8 (Figura 12A), apresentando o menor valor entre os turnos de irrigação (33,52%), valor esse que foi elevado para 38,50% ao utilizar a concentração de 10 mM de prolina, representando o aumento de 14,86%. Contudo, nos demais turnos de rega, à aplicação de prolina resultou em redução de 17,17% no DSH das plantas do T4, não apresentando diferença significativa para os demais tratamentos. Porém os valores apresentados na pesquisa estão de acordo com o aceitável (KALAPPOS, 1994), em vista a condição de semiaridez onde pesquisa foi conduzida, sendo comum perdas excessivas pelo processo de transpiração (AMUTENYA et al., 2023).





Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

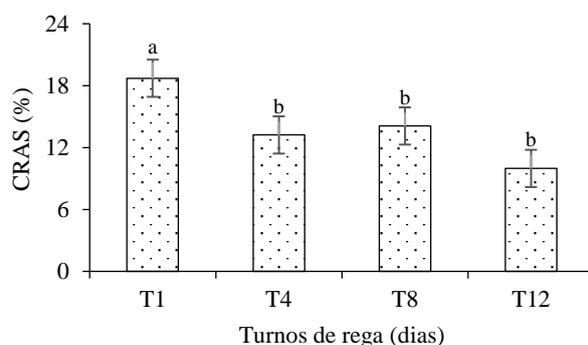
Figura 12. Déficit de saturação hídrica foliar - DSH (A), fluorescência máxima - Fm (B) e variável - Fv (C) da pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplante.

Para a fluorescência máxima - Fm (Figura 12B), o aumento no intervalo entre as irrigações nas plantas sem aplicação de prolina proporcionou alterações no T12, com redução de 16,34% ao observado no T1 (553,13). Valor esse que foi alterado com a aplicação de prolina, onde a concentração de 10 mM resultou em perda de 13,87% no T1, resultando no valor de 476,38, não diferindo a Fm dos demais turnos de irrigação. Tamanha redução estabelecida aos 12 dias corrobora com as perdas estabelecidas nas clorofilas, sobretudo da Cl *a*, afetando a captação máxima de fótons pelo fotossistema. Comportamento equilibrado pela aplicação de prolina, que por atuar como osmoprotetor

e regulador de genes envolvidos ao estresse, mantem a captação de energia a cadeia transportadora de elétrons e, conseqüentemente a produção de ATP e NADPH (GHOSH et al., 2022).

Diferindo da Fm, a fluorescência variável (Fv) não apresentou diferença significativa entre os turnos de irrigação nas plantas sem e sob pulverização com prolina (Figura 12C). Contudo, as plantas que receberam aplicação de prolina na concentração de 10 mM no T1 apresentaram redução de 16,47% ao comparado as plantas sem aplicação de prolina, porém sem se diferenciar do obtido para aos demais turnos de irrigação com aplicação de prolina. Fato que se torna importante, ao ponto que mesmo a captação de energia sendo menor e alguns pontos, a regulação na captação de fóton a valor inferior de energia, equilibrando a disponibilidade destinada a cadeia transportadora, mantendo à atividade fotoquímica (KHAN et al., 2024).

O efeito torna-se interessante ao observar o conteúdo relativo de água do solo (Figura 13), onde os turnos de irrigação crescentes apresentam reduções de 29,38, 24,73 e 46,74% em relação ao obtido no T1, sem diferenças significativas entre os demais turnos de irrigação. Isso demonstra que a manutenção dos aspectos fisiológicos das plantas de pinheira depende do ajustamento osmótico, especialmente pela produção de osmólitos, para manter o fluxo hídrico, e da atividade antioxidante, em resposta às condições de baixa umidade e alta temperatura (ZAHEDI et al., 2021).



Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 13. Conteúdo de água do solo em função dos turnos de irrigação, aos 894 dias após o transplante.

Para a análise de componentes principais (Figura 14), nota-se que a representatividade dos dois primeiros componentes (PC1 e PC2) representa 67,59% da variação apresentadas dos dados. Desses, 42,52% é representado pelo PC1, associado à

correlação positiva entre as clorofilas ($Cl a$, $r = 0,82$; $Cl b$, $r = 0,76$; $Cl t$, $r = 0,85$), carotenoides (Car , $r = 0,85$) e fluorescências (F_0 , $r = 0,78$; F_m , $r = 0,69$; F_v , $r = 0,66$), favorecido pelos tratamentos do grupo 1, sendo correlação negativa estabelecida com a produção ($Prod$, $r = -0,61$), relacionado aos tratamentos do grupo 4. O PC2 explica 25,1% da variação dos dados, sendo a correlação positiva estabelecida entre o extravasamento de eletrólitos (EE , $r = 0,63$) e eficiência quântica do fotossistema (F_v/F_m , $r = 0,78$), favorecido pelos tratamentos do grupo 1 e inversamente proporcional ao grupo 2. O grupo 3 apresenta uma baixa influencia pelas variáveis correlacionadas.

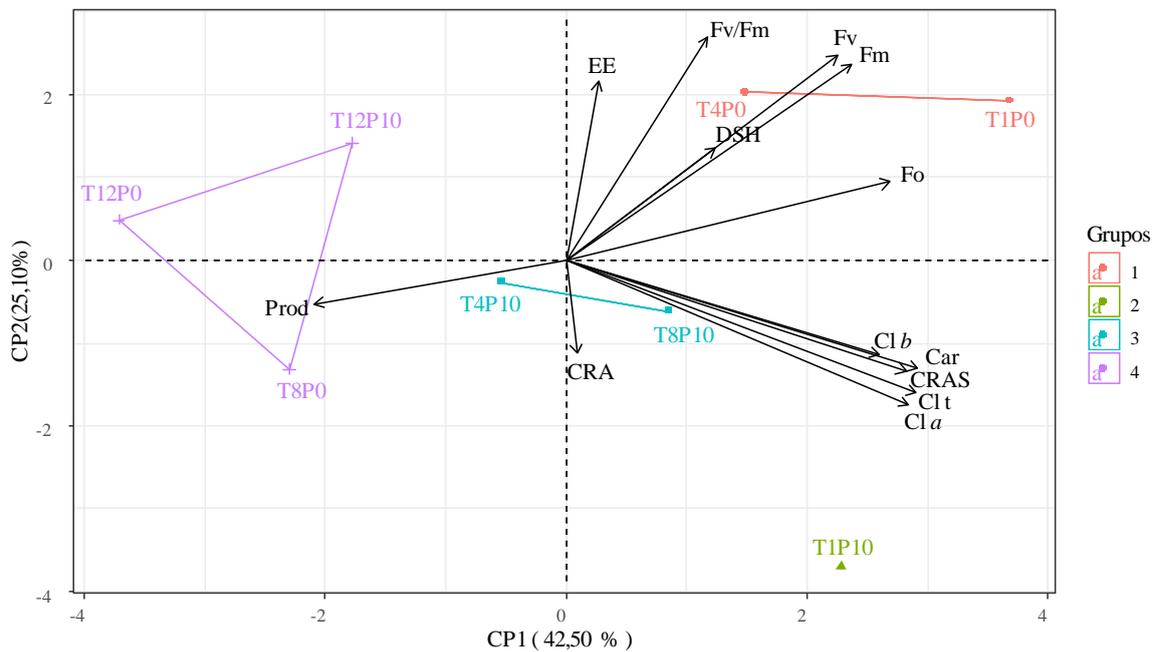


Figura 14. Projecção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina via foliar – P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).

Dessa forma, fica claro que as plantas sob o turno de irrigação de 12 dias apresentam uma adaptação fotoquímica para estabelecer a produção da pinheira, tendo em vista a falta de efeito na variável de produtividade do segundo ano, reduzindo o potencial energético como forma de evitar danos advindos do estresse oxidativo provenientes da restrição metabólica ocasionada pelo déficit hídrico (ZULFIQAR et al., 2020). Esse comportamento é favorecido apenas em plantas a até 4 dias sem irrigação, que apresentam maior relação à fluorescência mesmo que elevando os danos à membrana celular,

mantendo o fluxo metabólico capaz de regular o ciclo vegetal (AMUTENYA et al., 2023; KHAN et al., 2024).

5.2. Produção total e qualidade físico-química de frutos

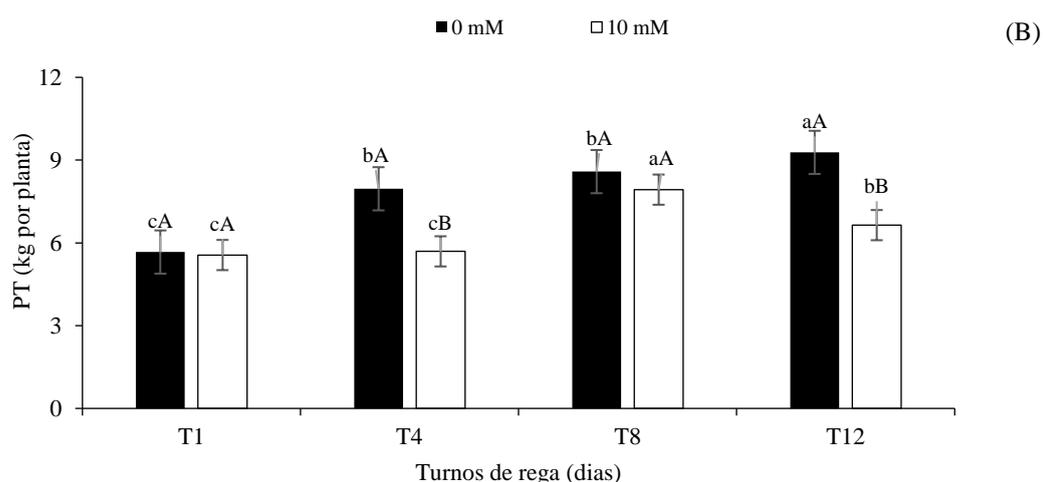
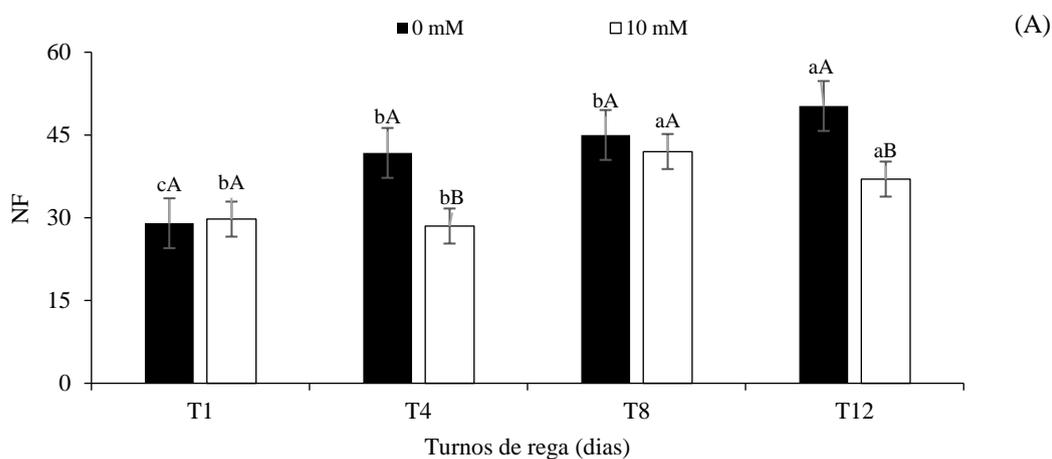
De acordo com o resumo de análise de variância (Tabela 4), a interação dos fatores foi significativa para as variáveis de número de frutos (NF), produção total (PT), acidez titulável (AT), peso de casca (PC) e sementes (PS). De forma isolada, a prolina proporcionou efeito significativo para o número de sementes (NS). Para as demais variáveis não foram estabelecidas respostas significativas dos fatores.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para número de frutos (NFP), peso médio de frutos (PMF), produção total (PT), diâmetro transversal (DT) e longitudinal (DL) de frutos, número de gomos por fruto (NG), acidez titulável (AT), sólidos solúveis (SS), ácido ascórbico (AsA), açúcar total (A), peso de casca (PC), sementes (PS) e polpa (PP), número de sementes (NS) e rendimento de polpa (Rend) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P).

Variáveis	Quadrado médio								
	Turnos (T)	Prolina (P)	T × P	Bloco	Erro 1	Erro 2	CV1 (%)	CV2 (%)	Média
NF	385,40**	413,14**	102,75**	35,86 ^{ns}	9,76	6,61	8,24	6,78	37,91
PMF	238,69 ^{ns}	41,71 ^{ns}	218,87 ^{ns}	282,84 ^{ns}	6,36	5,35	6,36	5,35	190,75
PT	14,08**	9,71**	4,05**	2,48 ^{ns}	1,66	1,11	14,15	10,88	7,09
DT	2,57 ^{ns}	1,35 ^{ns}	2,00 ^{ns}	9,70 ^{ns}	5,01	2,93	3,12	2,39	71,78
DL	12,27 ^{ns}	19,14 ^{ns}	10,93 ^{ns}	0,96 ^{ns}	5,06	4,51	3,09	2,91	72,93
NG	6,55 ^{ns}	28,16 ^{ns}	10,29 ^{ns}	29,38 ^{ns}	9,62	7,59	3,25	2,89	95,37
AT	0,48**	0,29**	0,21**	0,02 ^{ns}	0,021	0,017	7,59	6,79	1,92
SS	2,77 ^{ns}	1,11 ^{ns}	1,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	1,02	1,85	25,22	1,85	25,22
AsA	29,34 ^{ns}	10,35 ^{ns}	135,57 ^{ns}	4,12 ^{ns}	2,27	3,92	9,21	12,11	16,36
A	3,00 ^{ns}	4,09 ^{ns}	2,94 ^{ns}	0,98 ^{ns}	1,14	1,49	12,31	14,02	8,70
PC	48,89 ^{ns}	1366,34**	143,99**	25,26 ^{ns}	26,17	22,65	6,68	6,21	76,58
PS	30,97**	50,00**	13,53**	0,27 ^{ns}	2,10	1,30	11,36	8,91	12,77
PP	76,59 ^{ns}	142,59 ^{ns}	313,12 ^{ns}	113,31 ^{ns}	40,38	141,39	6,72	12,58	94,50
NS	20,72 ^{ns}	28,29*	18,2 ^{ns}	2,72 ^{ns}	9,69	5,86	9,20	7,15	33,84
Rend	0,010 ^{ns}	0,007 ^{ns}	0,017 ^{ns}	0,016*	0,002	0,008	9,54	17,44	0,51
GL	3	1	3	3	9	12	-	-	-

^{ns}, **, * respectivamente não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$

O número de frutos de pinheira, nas plantas sem aplicação de prolina, foi elevado pelos turnos de irrigação (Figura 15A), sendo o maior valor estabelecido nas plantas sob T12 (50,25 frutos por planta), que apresentou ganho de 20,35% ao T4 e 73,27% ao obtido no T1, esse que foi o menor NF estabelecido (29 frutos por planta), o qual foi elevado em 43,96% pelo T4 e 55,17% pelo T8. Já à aplicação de prolina proporciona perdas no NF, sendo essa de 31,74% no T4 e 26,37% no T12. Contudo, ao compara os turnos de irrigação nas plantas que receberam aplicação de 10 mM de prolina, nota-se que os maiores valores foram estabelecidos nas plantas sob T8 (42 frutos por planta) e T12 (37 frutos por planta), ambas superior ao estabelecido no T1 (29,75 frutos por planta) e T4 (28,5 frutos por planta). Fato que pode estar relacionado ao intervalo de irrigação ocasionar aumento no florescimento da planta, estímulo normalmente observado em plantas submetidas em condição de déficit hídrico (ZUAZO et al., 2021).



Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 15. Número de frutos por planta - NF (A) e produção total – PT de pinheira (B), em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplantio.

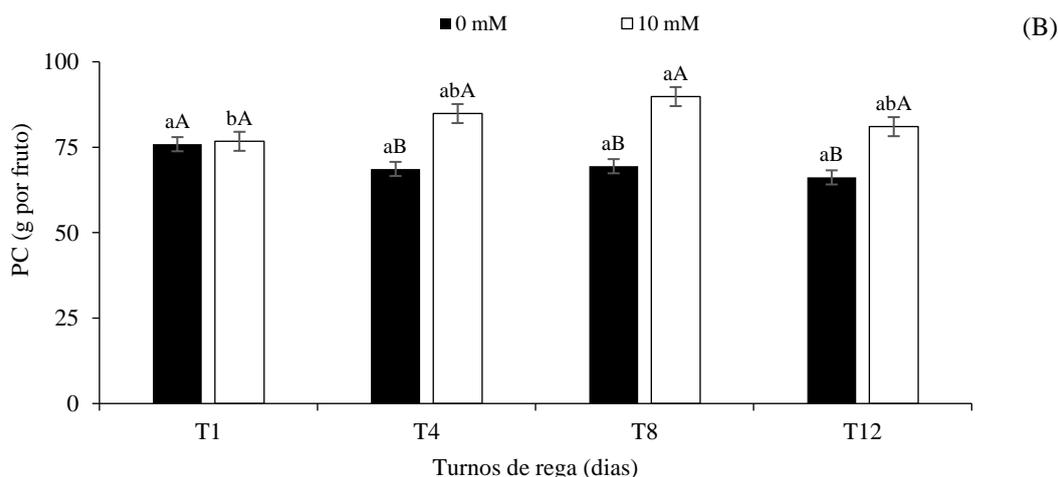
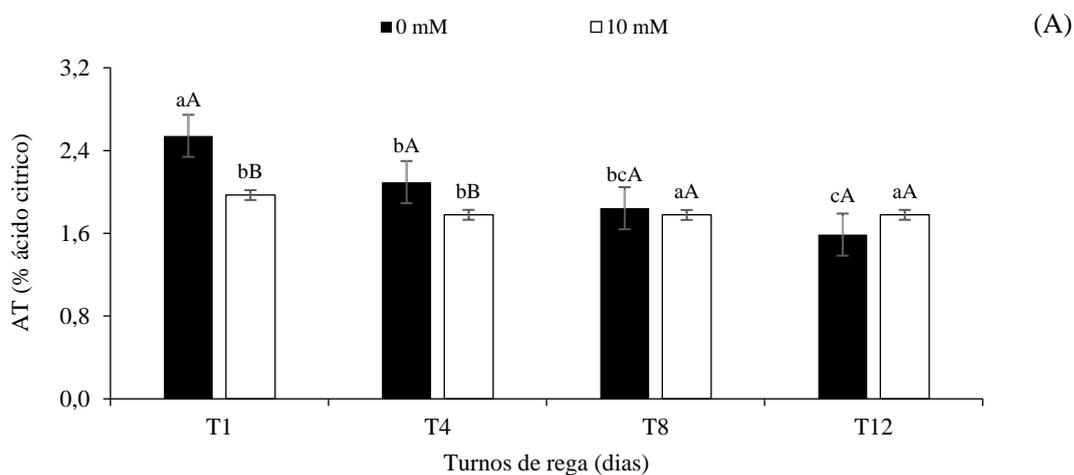
Em vista ao obtido no NF, a produção total de pinheira apresentou o maior valor no T12 (9,28 kg por planta), porém sem apresentar diferença significativa do T8 (8,58 kg por planta), mas sendo superior em 16,58 e 63,67% ao obtido no T4 e T1, respectivamente (Figura 15B). Vale ressaltar que o T4 e T8 também apresentaram ganhos no NF em relação ao T1, sendo esses de 40,39 e 51,32%. A aplicação de prolina estabelece a respectiva perda de 28,52 e 28,45% na PT de pinheira sob o T4 e T12, sendo que para os demais turnos não se observa diferença significativa das plantas sem e com aplicação de prolina. Desta forma, ao comparar os turnos de irrigação das plantas que receberam pulverização foliar com prolina, nota-se que o T8 apresenta o maior valor (7,93 kg por planta), seguido pelo T12 (6,64 kg por planta), e ambos superior ao estabelecido no T1 e T4, esses que não apresentaram diferenças significativas entre si. Ganhos na produção pelo aumento no intervalo de irrigação foram constatados na cultura do tomateiro (*Solanum lycopersicum*) por Liu et al. (2019). No entanto o efeito negativo da prolina pode estar relacionado ao investimento na manutenção do metabolismo secundário, ocasionando gastos de fotoassimilados, a síntese de antioxidantes e osmólitos, afetando o processo de formação de frutos e, conseqüentemente, a produção (SUEKAWA et al., 2019).

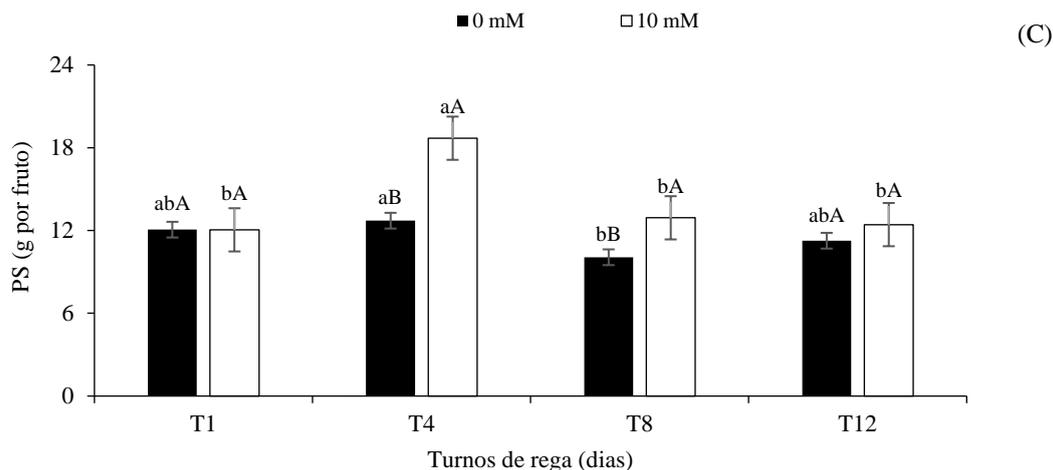
A acidez titulável dos frutos de pinheira foi reduzida com o aumento no intervalo entre os turnos de irrigação (Figura 16A), apresentando perdas em relação ao T1 de 17,72% no T4, 27,56% no T8 e 37,40% no T12. Além disso, o T8 apresenta diferença de 23,92% em relação ao T4. A aplicação de prolina contribuiu para reduzir a AT dos frutos de pinheira no T1 e T4, representando a respectiva perda de 22,44 e 14,83%, corroborando assim para não se observa diferença significativa entre os turnos de irrigação nas plantas que receberam aplicação da concentração de 10 mM de prolina.

No entanto, mesmo apresentando reduções, o teor de AT apresenta valores bem elevado em relação ao relatado na literatura, que se encontra na faixa de 0,16% de AT (CAVALCANTE et al., 2011). Fato que se associa a condição ambiental na época de avaliação, em que a elevada temperatura e baixa umidade do ar acelera a respiração e à atividade enzimática, levando à produção de ácidos orgânicos, como o ácido cítrico e o ácido tartárico (FAMIANI et al., 2015), condição amenizada pelo aumento da regulação

metabólica provocada pela aplicação exógena de prolina (TONHATI et al., 2020) e em plantas sob períodos de aclimação ao estresse (FÁTIMA et al., 2024).

O peso da casca dos frutos de pinheira, nas plantas sem aplicação de prolina, não apresentaram alterações pelos turnos de irrigação (Figura 16B). Contudo, à aplicação de prolina resultou em ganhos no PC nos turnos de irrigação superior a 1 dia, com aumento de 23,60; 22,69 e 18,33% em relação as plantas que não receberam aplicação de prolina do T4, T8 e T12, respectivamente. Porém, nesse caso, sendo observada diferença significativa apenas para T8 em relação a T1, apresentando ganho de 17,06%. Fato que se relaciona a função da prolina na ativação de genes envolvidos na biossíntese de componentes da parede celular, como celulose, hemicelulose, lignina e pectina, favorecendo a expansão da casca (KISHOR et al., 2015).

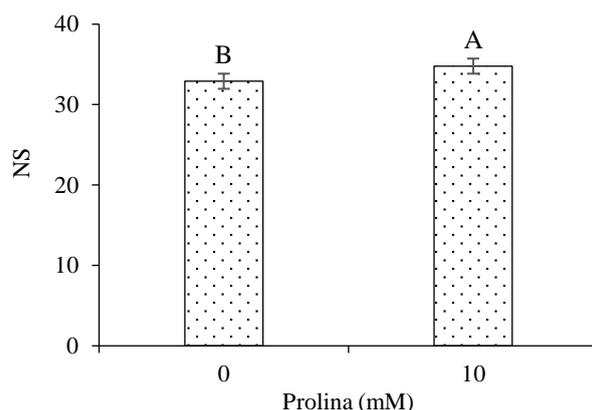




Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 16. Acidez titulável (A), peso de casca (B) e peso de sementes (C) em função da interação entre os turnos de irrigação e prolina, aos 894 dias após o transplântio.

Para o peso de sementes (Figura 16C), sem prolina, os valores estabelecidos pelos turnos de irrigação não diferenciaram do T1 (12,06 g por fruto), sendo a diferença estabelecida entre o T4 (12,71 g por fruto) para T8 (10,06 g por fruto), que apresentou redução de 20,85%. Já com a pulverização foliar com prolina, observa-se aumento no NS de 47,05% no T4, resultando no maior valor entre os turnos de irrigação (18,69 g por fruto). Benefícios que também foram observados no T8, que apresentou aumento de 28,43% no PS, porém sem se diferenciar dos demais turnos de irrigação. Em vista que o peso de sementes pela aplicação de prolina pode estar relacionada a uma estratégia de sobrevivência, pois a prolina induz o aumento no número de sementes (Figura 17), passando do valor de 33 sementes nas plantas sem aplicação de prolina para 35 sementes ao aplicar a concentração de 10 mM, resultando no incremento de 5,72%. Comportamento similar foi observado por Alam et al. (2016) em milho (*Zea mays* L.), que associou a regulação na absorção de nutrientes e ao ganho metabólica à aplicação exógena de prolina de até 25 mM.



Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 17. Número de sementes de pinheira, em função da aplicação de prolina, aos 894 dias após o transplantio.

Para o componente principal (Figura 18), a representatividade de 72,43% da variação dos dados pode ser explicada em dois componentes, sendo que o primeiro corresponde a 42,24%, associado à alta correlação entre o número de frutos (NF = -0,83) e produção da pinheira (PT, $r = -0,79$), com os tratamentos do grupo 3, a qual apresenta correlação negativa com as variáveis de peso (PF, $r = 0,72$), diâmetros do fruto (DL, $r = 0,79$; DT, $r = 0,82$), além de peso (PS, $r = 0,88$) e número de sementes (NS, $r = 0,68$), representada nos tratamentos do grupo 2. O segundo eixo representa 30,19% da variação dos dados, a qual é representada pela correlação entre a acidez total (AT, $r = 0,75$), teor de vitamina C (AsA, $r = 0,66$), peso de polpa (PP, $r = 0,86$) e rendimento do fruto (Rend, $r = 0,87$), presentes com maior relevância nos tratamentos do grupo 1.

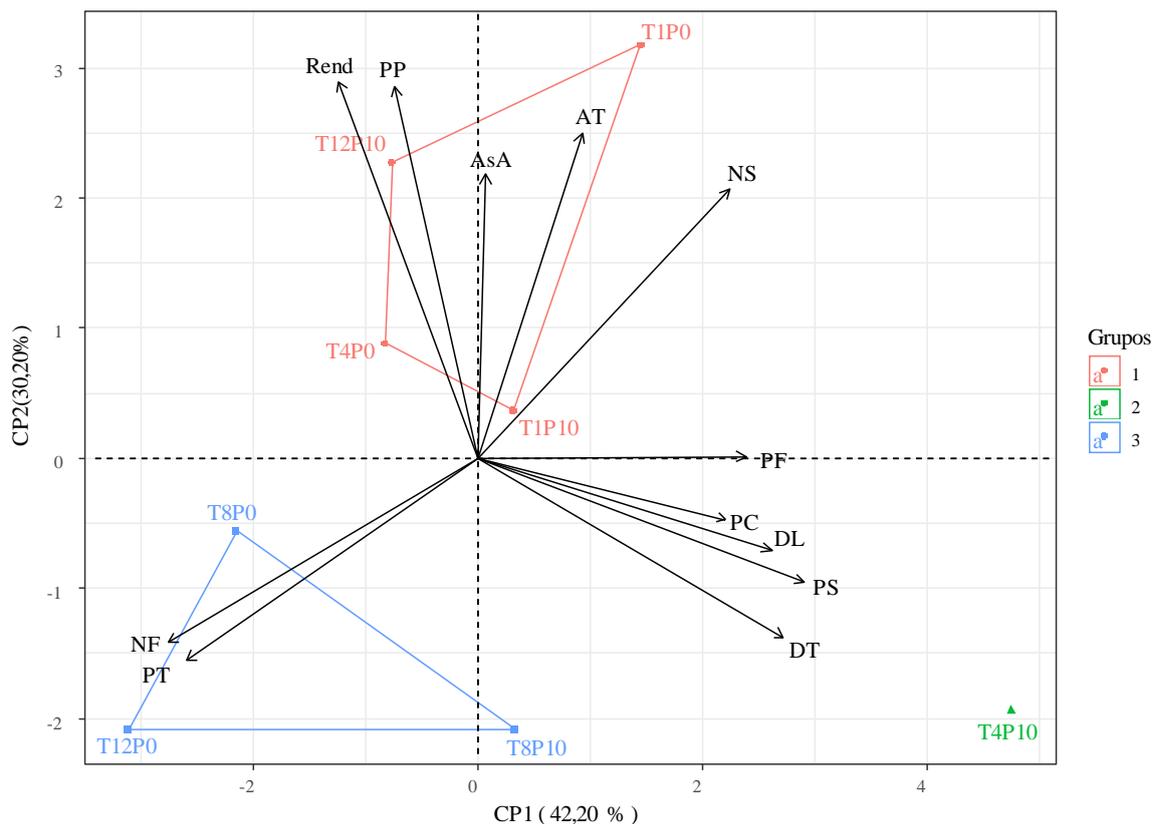


Figura 18. Projeção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina– P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).

Desta forma, o comportamento observado demonstra que a manutenção da formação do fruto se estabelece de maneira mais acentuada do que as características de crescimento do fruto na produção da pinheira, especialmente nos maiores turnos de irrigação, o que se relaciona ao processo de floração induzido em plantas mantidas em períodos de déficit hídrico, sinalizando o processo de propagação da planta (ZUAZO et al., 2021). Esse aumento de frutos resulta em maior consumo de fotoassimilados pelos drenos, devido ao gasto energético destinado à manutenção do metabolismo secundário da planta, resultando em frutos menores, com peso médio de 190 g, inferior à faixa de 280 a 360 g estabelecida por Pereira et al. (2003) para frutos de pinheira, o que se relaciona à condição de estresse natural causada pelo clima de semiaridez do local da pesquisa (CAVALCANTE et al., 2011).

Além disso, o investimento na produção de polpa, mesmo sem apresentar efeito significativo dos tratamentos, mostra rendimento médio superior (0,51) ao padrão estabelecido (0,41 a 0,47) na literatura (ARAÚJO, 2003; ARAÚJO et al., 2008),

demonstrando que o enchimento do fruto ressalta o aumento de substâncias antioxidantes, como o ácido ascórbico, provavelmente para manter a integridade do fruto, dado à alta influência do aumento de ácidos orgânicos, comportamento que ocorre, sobretudo, nos tratamentos com menor intervalo de irrigação.

5.3. Teores foliares de nutrientes e produtividade de pinheira

Conforme o apresentado na Tabela 5, o resumo de análise de variância demonstra efeito significativo da interação entre os fatores (T × P) para os teores de nitrogênio (N) e enxofre (S) foliar, bem como para a produtividade (PROD) de pinheira. Efeito isolado do fator turnos de rega foi observado para os teores de fósforo (P). Por outro lado, não foi observado efeito significativo das fontes de variação para as demais variáveis analisadas.

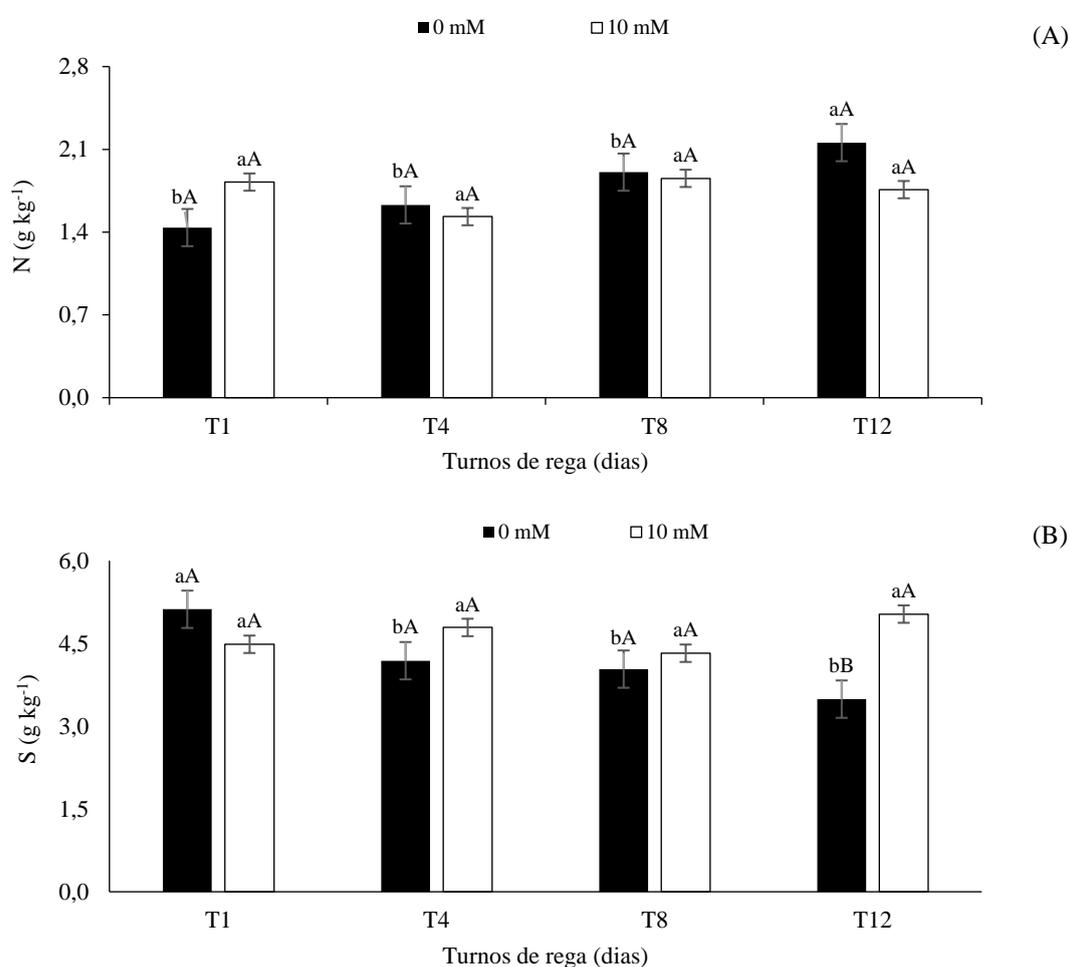
Tabela 5. Resumo da análise de variância para teor foliar de nitrogênio (N), enxofre (S), fósforo (P), potássio (K), sódio (Na), cloreto (Cl) e produtividade (PROD) de pinheira cultivada sob turnos de irrigação (T) e aplicações foliares de prolina (P), aos 894 dias após o transplante (DAT).

Variáveis	Quadrado médio								
	Turnos (T)	Prolina (P)	T × P	Bloco	Erro 1	Erro 2	CV1 (%)	CV2 (%)	Média
N	2,72**	0,01 ^{ns}	0,21**	0,11*	0,03	0,02	9,37	7,69	17,6
S	0,62 ^{ns}	1,62*	1,61**	0,74 ^{ns}	0,30	0,24	12,29	11,06	4,43
P	0,075**	2,0e-4 ^{ns}	0,008 ^{ns}	0,040**	0,002	0,018	2,47	7,25	1,87
K	0,18 ^{ns}	1,19 ^{ns}	2,81 ^{ns}	2,11 ^{ns}	1,41	2,81	11,54	9,87	10,31
Na	96,48 ^{ns}	7,33 ^{ns}	14,93 ^{ns}	24,14 ^{ns}	111,64	49,98	12,96	8,67	81,54
Cl	3,40 ^{ns}	0,44 ^{ns}	3,04 ^{ns}	3,97 ^{ns}	1,78	1,90	24,29	25,09	5,49
PROD	32,14**	44,46**	8,36**	6,29**	0,62	0,62	10,60	11,61	11,94
GL	3	1	3	3	9	12	-	-	-

^{ns}, **, * respectivamente não significativo, significativo a $p \leq 0,01$ e $p \leq 0,05$

Os teores de nitrogênio de pinheira das plantas sem aplicação de prolina foi elevado pelo maior turno de irrigação (Figura 19A), passando do valor de 14,40 g kg⁻¹ no T1 para 21,60 g kg⁻¹ no T12, o que representa o aumento de 50% no teor de N foliar. No entanto, com a aplicação de prolina, observa-se uma redução nos teores de N das plantas sob T12 (17,60 g kg⁻¹), porém sem se diferenciar significativamente das plantas sem prolina, comportamento que se observa nas demais estratégias, que também não se diferenciaram

significativamente entre si. Desta forma, esses aumentos se associa a necessidade de aclimatação das plantas a condição de déficit hídrico, em vista a função desse elemento na atividade metabólica, participando da síntese de enzimas que participam de processos bioquímicos essenciais, como a respiração e a produção de ácidos orgânicos (LUO et al., 2020). Vale ressaltar que os teores médios obtidos na presente pesquisa ($17,62 \text{ g kg}^{-1}$) são inferiores ao estabelecido por Cavalcante et al. (2012) após 36 ($28,69 \text{ g kg}^{-1}$) e 48 ($27,97 \text{ g kg}^{-1}$) meses de cultivo em condições do brejo paraibano, de clima quente e úmido. Reforçando a resposta que a condição de semiárido onde a presente pesquisa foi conduzida interfere no fluxo de solutos na planta (LIU et al., 2019), corroborando com as respostas obtidas por Lima et al. (2023) em maracujazeiro-azedo (*Passiflora edulis* Sims).



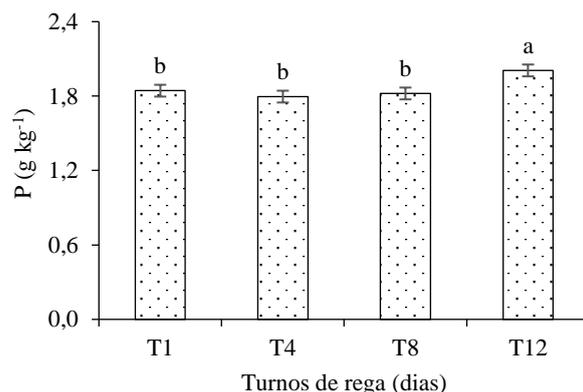
Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 19. Teores foliares de nitrogênio – N (A) e enxofre - S (B) de pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplantio.

Já para os teores de enxofre foliar (Figura 19B), o menor valor foi estabelecido nas plantas sob T12, apresentando o valor de $3,49 \text{ g kg}^{-1}$, o qual foi 46,70% inferior ao estabelecido nas plantas sob T1, com valor de $5,12 \text{ g kg}^{-1}$, o maior estabelecido. As plantas que receberam prolina elevaram os teores de S foliar no T12, sendo observado o valor de $5,03 \text{ g kg}^{-1}$, superior em 44,13% ao observado nas plantas sem prolina no mesmo turno de irrigação. Esse aumento contribuiu para não apresentar diferenças entre os teores de S nos turnos de irrigação, pois, com exceção o T12, os demais turnos não apresentaram alterações significativas nos teores de S foliar entre as plantas sem e com prolina. Ao ponto que o enxofre corrobora para a síntese de pigmentos fotossintéticos (SHAH et al., 2022), os teores menores desse elemento sob o maior período de turno de irrigação corrobora com a redução obtida nos teores de clorofila, o que se relaciona a sua baixa mobilidade na planta (LI et al., 2020), que se deve a redução estabelecida no CRAS, reduzindo à absorção por fluxo de massa pelas raízes e, conseqüentemente, afetando seu acúmulo, efeito que é atenuado pela aplicação de prolina, que apresenta como principal ação a manutenção do potencial osmótico do sistema radicular, mantendo o fluxo hídrico da planta (ALVAREZ et al., 2022).

Além disso, os teores de S obtidos apresenta valores superiores ao máximo obtido por Cavalcante et al. (2012) aos 36 meses, $4,13 \text{ g kg}^{-1}$, sendo valores inferiores estabelecidos apenas no T12 ($3,49 \text{ g kg}^{-1}$), contudo, os valores estão dentro da faixa considerada adequada por Silva e Silva (1997) que estabelece valores acima de $1,5 \text{ g kg}^{-1}$ adequado para plantas de anonáceas. Fato que corrobora com os valores de P foliar obtido na pesquisa (Figura 20), sendo que mesmo o T12 ($2,01 \text{ g kg}^{-1}$) apresentando aumento de 9,24% ao obtido no T1 ($1,84 \text{ g kg}^{-1}$), os valores são superiores a $1,61 \text{ g kg}^{-1}$, obtido por Cavalcante et al. (2012) e superior a faixa de 1,4-1,5 estabelecida por Silva e Silva (1997).

Porém, esse aumento nos teores de P foliar em plantas sob turno de irrigação de 12 dias é um indicativo do aumento do potencial energético das plantas, ao ponto de que o P é um componente chave do ATP (adenosina trifosfato), a principal fonte de energia das plantas, ajudando a manter as funções celulares mesmo sob déficit hídrico (KHAN et al., 2023), além disso, o aumento nos teores foliares de P podem indicar uma regulação na absorção desse elemento via difusão, que relaciona ao crescimento radicular em plantas sob condição de seca (MAUREL; NACRY, 2020).

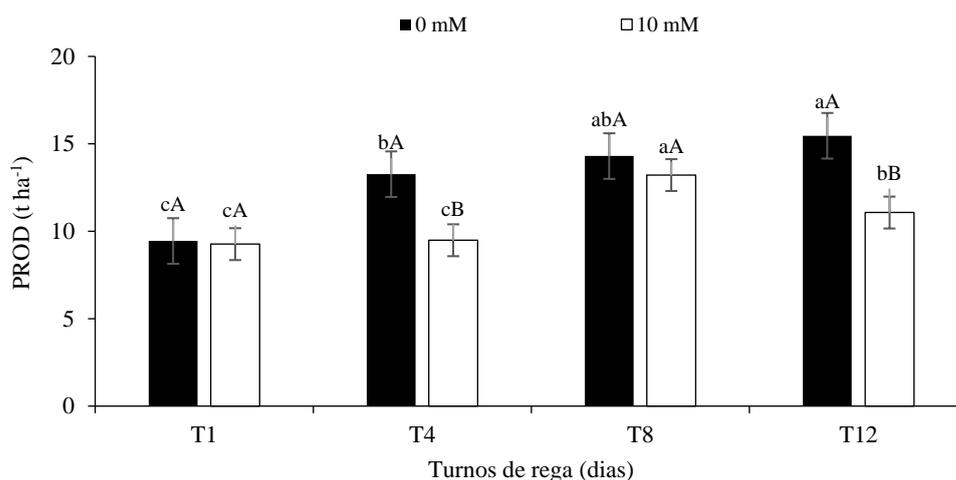


Médias seguidas por letras diferentes apresentam diferença significativa entre os tratamentos pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 20. Teores foliares de fósforo de pinheira, em função dos turnos de rega, aos 894 dias após o transplantio.

A produtividade da pinheira, nas plantas sem aplicação de prolina, foi elevada pelos intervalos dos turnos de irrigação (Figura 21), sendo o menor valor estabelecido nas plantas sob T1 ($9,44 \text{ t ha}^{-1}$), com o respectivo aumento de 40,47; 51,48 e 63,77% pelos acréscimos de dias nos turnos de irrigação, demonstrando que a maior produtividade foi alcançada no T12, cujo valor de $15,46 \text{ t ha}^{-1}$ não diferiu do observado no T8, porém superior em 16,59% ao obtido no T4. Com prolina, quando comparada as plantas sem aplicação, nota-se redução de 28,43 e 28,34% na produtividade da pinheira sob T4 e T12, não sendo observada diferença nas demais estratégias.

Comportamento esse que apresenta o maior valor no T8, porém com o T12 sendo superior aos demais turnos. Vale ressaltar que a produtividade alcançada na presente pesquisa supera ao da média nacional ($2,51 \text{ t ha}^{-1}$) conforme os dados do IBGE (2017), sendo até mesmo superior a margem de $7,19 - 8,88 \text{ t ha}^{-1}$ obtida por Jangid et al. (2019) em condição de clima semiárido da região de Anand na Índia. Fato que se deve ao adensamento de plantio, que em pesquisas recentes tem demonstrado que além de reduzir a temperatura, contribui para a retenção de umidade do solo em vista que reduz a evaporação excessiva do solo (HAQUE; SAKIMIN, 2022).



Nos turnos de rega, barras com a mesma letra minúscula indicam não haver diferença significativa (Tukey, $p \leq 0,05$); entre as concentrações de prolina, barras com mesma letra maiúscula indicam que as médias em cada turno de rega não diferem entre si pelo teste F ($p \leq 0,05$). Barra na vertical representa o erro padrão da média ($n=4$).

Figura 21. Produtividade de pinheira, em função da interação entre os turnos de rega e prolina, aos 894 dias após o transplantio.

A correlação entre as variáveis expressa através da análise de componente principal, sendo empregados dois eixos que juntos representam 82,64% da variação dos dados (Figura 22). No PC1 é possível explicar 60,54% da variação dos dados, sendo possível observar correlação forte entre a produtividade e os teores foliares de nitrogênio (N, $r = 0,95$) e fósforo (P, $r = 0,68$), o que é favorecido principalmente no tratamento do grupo 4, sendo essa correlação negativa com os teores de enxofre foliar (S, $r = 0,90$), favorecida pelos tratamentos do grupo 1. O PC2 representa 22,09% da variação dos dados, apresenta os teores de sódio (Na, $r = -0,91$), esse que não influencia as demais variáveis, sendo os tratamentos do grupo 2 o que apresentou a maior relação nesse eixo. O grupo 3 apresentou a menor relação entre as variáveis correlacionadas.

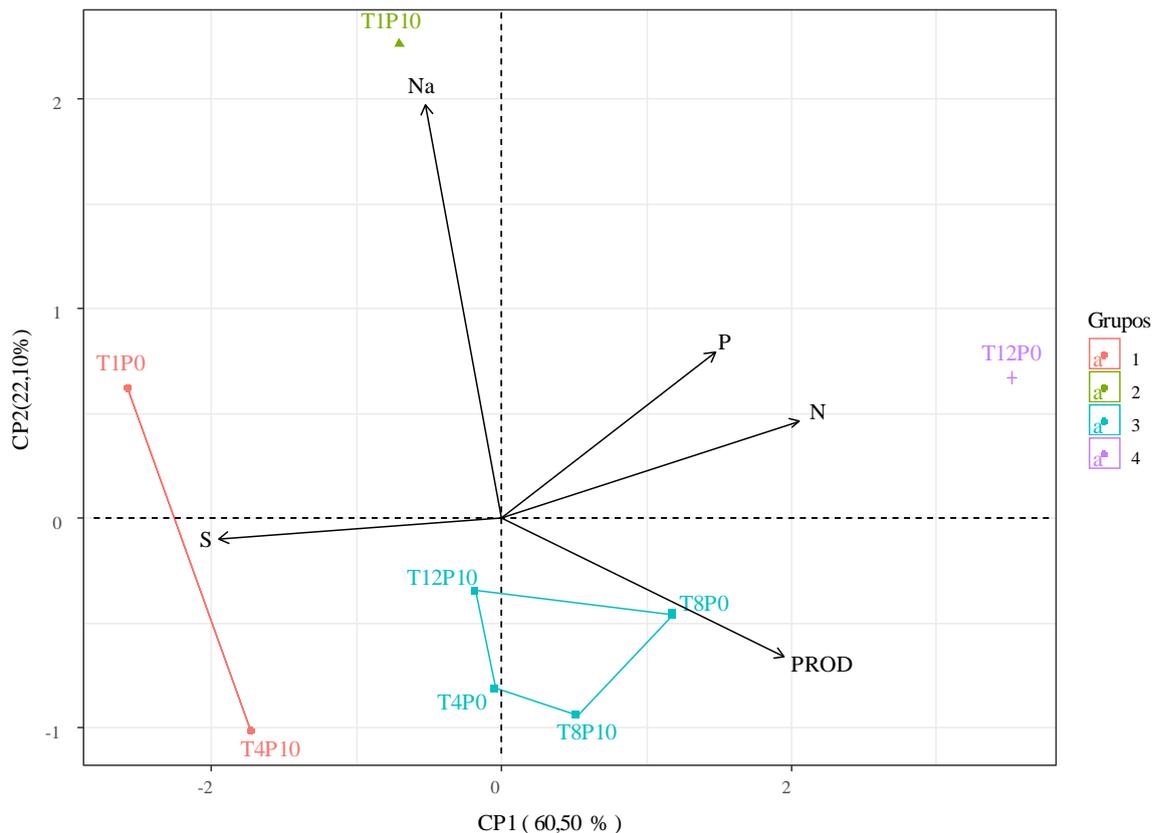


Figura 22. Projecção bidimensional dos escores dos componentes principais para os fatores turnos de irrigação – T e prolina via foliar – P e das variáveis analisadas nos dois componentes principais (CP1 e CP2).

Esse comportamento demonstra que a condição de déficit hídrico induzida em períodos controlados contribuiu para a formação de plantas com maior aclimação a condição de semiaridez, em vista que além de induzir a floração, melhorou à absorção de nutrientes, como N e P, que reforçam a ideia do aumento do metabolismo secundário, estabelecendo um aproveitamento acentuado de fotoassimilados pela planta com ganhos em sua produtividade (LUO et al., 2020; MAUREL; NACRY, 2020).

Em vista a relação negativa com o S nas folhas pode ser devido esse elemento ser destinado ao fruto com base em sua baixa translocação na planta. Além disso, esse comportamento pode ter sido favorecido pelas sementes utilizadas para a formação do pomar, que por se tratar de plantas crioulas submetidas a períodos prolongados de estresse podem ocasionar à atividade de genes de forma precoce e assim reforçando a aclimação ao período de seca (LIU et al., 2022), o que reduz a ação da prolina de forma exógena, podendo essa substância já ser sinalizada de forma satisfatória pela planta nos períodos de seca (WANG et al., 2022).

6. CONCLUSÕES

A irrigação com turno de rega de 12 dias resulta em alterações na fisiologia no segundo ano de cultivo da pinheira, afetando negativamente a síntese de pigmentos fotossintéticos e a fluorescência máxima.

Os componentes de produção e a qualidade dos frutos de pinheira em dois anos de cultivo são beneficiados pelo aumento no intervalo dos turnos de irrigação.

Os teores de nutrientes foliares foram alterados com turno de irrigação de 12 dias, contudo, com exceção dos teores de nitrogênio, as plantas de pinheira se encontram em níveis de suficiência nutricional.

Apesar de contribuir na redução do extravasamento de eletrólitos no limbo foliar, a aplicação foliar de prolina não apresenta benefícios na fisiologia e componentes de produção de pinheira.

O turno de irrigação de até 12 dias demonstrar ser eficiente para otimizar o uso da água no cultivo de pinheira no semiárido paraibano.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABDALLA, N.; TAHA, N.; EL-RAMADY, H.; BAYOUMI, Y. Manejo do estresse térmico em mudas de tomateiro em regiões áridas e semiáridas: uma revisão. **Meio Ambiente, Biodiversidade e Segurança do Solo**, v. 4, p. 47-58, 2020.
- AHMAD, Z.; WARAICH, E. A.; AKHTAR, S.; AHMAD, S.; HASSAN, M.; MANZOOR, S.; MASOOD, N.; RIZWAN, M. Physiological responses of wheat to drought stress and its mitigation approaches. **Acta Physiologiae Plantarum**, v. 40, e80, 2018.
- ALAM, R.; DAS, D. K.; ISLAM, M. R.; MURATA, Y.; HOQUE, M. A. Exogenous proline enhances nutrient uptake and confers tolerance to salt stress in maize (*Zea mays* L.). **Progressive Agriculture**, v. 27, p. 409-417, 2016.
- ALEMU, S. T. Photosynthesis limiting stresses under climate change scenarios and role of chlorophyll fluorescence: A review article. **Cogent Food & Agriculture**, v. 6, e1785136, 2020.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop requirements**. FAO, (Irrigation and drainage paper, 56) Rome, 328 p. 1998.
- ALMEIDA, J. P. F.; PEREIRA, F. A.; SANTOS, A. A. Irrigação de precisão na fruticultura. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 37, p.683-690, 2015.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, p. 711-728, 2019.
- ALVAREZ, M. E.; SAVOURÉ, A.; SZABADOS, L. Proline metabolism as regulatory hub. **Trends in Plant Science**, v. 27, p. 39-55, 2022.
- AMUTENYA, A.; KWEMBEYA, E.; SHIKANGALAH, R.; TSVUURA, Z. Photosynthesis, chlorophyll content and water potential of a mistletoe-host pair in a semi-arid savanna. **South African Journal of Botany**, v. 163, p. 311-315, 2023.
- AOAC. **Métodos oficiais da Association of Official Analytical Chemists**, 16^a ed. Arlington, TX: Associação de Químicos Analíticos Oficiais. 2005.
- ARAÚJO JÚNIOR, G. do N.; GOMES, F. T.; SILVA, M. J. da; JARDIM, A. M. F. R.; SIMÕES, V. J. L. P.; IZINDRO, J. L. P. S.; LEITE, M. I. M. M. V.; TEIXEIRA, V. I.; SILVA, T. G. F. Estresse hídrico em plantas forrageiras: Uma revisão. **Pubvet**, v. 13, p. 1-10, 2019.

- ARAÚJO, J. F. **A cultura da pinha**. Salvador: Egba, 2003. 79 p.
- ARAÚJO, J. F.; LEONEL, S.; NETO, J. P. Adubação organomineral e biofertilização líquida na produção de frutos de pinheira (*Annona squamosa* L.) no submédio São Francisco, Brasil. **Bioscience Journal**, v.24, p. 48-57, 2008.
- ARAÚJO, S. M. S. de. A região semiárida do Nordeste do Brasil : Questões ambientais e possibilidades de uso sustentável dos recursos. **Revista Rios Eletrônica**, v. 5, p. 89-98, 2011.
- ARGENTA, A. B.; SANTOS, M. L.; NOGUEIRA, A.; SCHEER, A. de P. **A produção do Conhecimento nas Ciências Agrárias e Ambientais 3**. Ponta Grossa-PR: [recurso eletrônico]/ Organizador Alan Mario Zuffo. Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019.
- BARROS, C. T.; ALMEIDA, N. M. Eficiência dos visitantes florais na polinização da *Annona squamosa* L. **Diversitas Journal**, v. 6, p. 99-113, 24, 2021.
- BASKARAN, R.; PULLENCHERI, D.; SOMASUNDARAM, R. Characterization of free, esterified and bound phenolics in custard apple (*Annona squamosa* L.) fruit pulp by UPLC-ESI-MS/MS. **Food Research International**, v. 82, p. 121-127, 2016.
- BASSI, R.; DALL'OSTO, L. Dissipation of light energy absorbed in excess: the molecular mechanisms. **Annual Review of Plant Biology**, v. 72, p. 47-76, 2021.
- BERNARDO, S.; MANTOVANI, E. C.; SILVA, D. D.; SOARES, A. A. **Manual de irrigação**. 9. ed. Viçosa: Editora UFV, 2019. 545 p.
- CACEFO, V. **Prolina endógena e exógena em plantas de tabaco submetidas à deficiência hídrica: respostas fisiológicas, bioquímicas, moleculares e no perfil ionômico**. 2019. 129f. Tese (Doutorado em Agronomia: Área de concentração em Produção Vegetal) – Universidade do Oeste Paulista, Presidente Prudente, 2020.
- CACEFO, V.; RIBAS, A. F.; GUIDORIZI, K. A.; VIEIRA, L. G. E. Exogenous proline alters the leaf ionic profiles of transgenic and wild-type tobacco plants under water deficit. **Industrial Crops and Products**, v.170, e113830, 2021.
- CAVALCANTE, Í. H. L.; MOURA, M. C. S. de; ROCHA, L. F. da; SILVA JÚNIOR da, G. B.; VASCONCELOS, MARTINS, L. de; SILVA, R. R. S. da. Seleção preliminar de genótipos de pinheira em Bom Jesus-PI. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 34, p.173-181, 2011.
- CAVALCANTE, L. F.; PEREIRA, W. E.; CURVÊLO, C. R. S.; NASCIMENTO, J. A. M.; CAVALCANTE, Í. H. L. Estado nutricional de pinheira sob adubação orgânica do solo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 43, p. 579-588, 2012.

- CHAI, Q.; GAN, Y.; ZHAO, C.; XU, H. L.; WASKOM, R. M.; SIDDIQUE, K. H. M. Regulated deficit irrigation for crop production under drought stress. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 36, p.1-21, 2016.
- CHAUDHRY, S.; SIDHU, G. P. S. Climate change regulated abiotic stress mechanisms in plants: A comprehensive review. **Plant Cell Reports**, v. 41, p.1-31, 2022.
- CHRISTIANSEN, J. E. Irrigation by sprinkling. Berkeley: California **Agricultural Station**. Bulletin 670, 1942. 124p.
- COHEN-HOCH, D.; FISCHER, D.; TRAKHTENBERG, Y.; FAHS, H.; FRANKEL, O. S.; FISCHER, S. O.; OREN, Z. C.; AVIDAN, M. Osmotic stress in roots drives lipoxygenase-dependent plastid remodeling through singlet oxygen production. **Plant Physiology**, v. 2024, n. 1, p. 2024.
- CRIDDLE, W. D.; DAVIS, S.; PAIR, C. H.; SHOCKLEY, D. G. Methods for evaluating irrigation systems. Washington DC: **Soil Conservation Service** - USDA, Agricultural Handbook 82, 1956. 24p.
- DAILSON, J.; OLIVEIRA, S. de; EDUARDO, E.; LEMOS, P. de; CARVALHO, R. V. de; FERREIRA, E.; BARROS, R.; MERCHED, C. Alterações fisiológicas no crescimento inicial de pinheira (*Annona squamosa* L.) submetida ao stresse hídrico submitted to water stress. **Revista de Ciências Agrárias**, v. 43, p. 53-63, 2019.
- FAMIANI, F.; BATTISTELLI, A.; MOSCATELLO, S.; CRUZ-CASTILLO, J. G.; WALKER, R. P. The organic acids that are accumulated in the flesh of fruits: occurrence, metabolism and factors affecting their contents - a review. **Revista Chapingo**, v. 21, p. 97-128, 2015.
- FÁTIMA, R. T. de; LIMA, G. S. de; SOARES, L. A. dos A.; LIMA, B. de M.; PEREIRA, M. B.; SILVA, A. A. R. da; PEREIRA, W. E. Production and postharvest quality of sour passion fruit under deficit irrigation strategies and foliar application of ascorbic acid. **New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science**, v.52, p. 1-25, 2024.
- FELIX, F. C.; ARAÚJO, F. dos S.; SILVA, M. D. da; FERRARI, C. dos S.; PACHECO, M. V. Estresse hídrico e térmico na germinação de sementes de *Leucaena leucocephala* (Lam.) de wil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.13, p.1-7, 2018.
- FERREIRA, A.; LOPES, J. C.; FLOES, M.; FERREIRA, S.; CRISTINA, T.; SOARES, B Tópicos Especiais em Produção Vegetal VI. In: **e-book**. CAUFES ed. Alegre: p. 553 il. 2016.

- FERREIRA, D. M. de; NAVANI, J. A.; ARAÚJO, A. L. C.; TINICO, J. D.; AMARAL, V. D. et al. Wastewater use in agriculture: Analytical limits of sewage for impact control in Brazil. **Revista Caatinga**, v. 32, p. 1048-1059, 2019.
- FERREIRA, G.; CHACÓN, I. de-LA-CRUZ.; BOARO, C. S. F.; BARON, D.; LEMOS, E. E. P. Propagation of Annonaceous plants. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, p.1-14, 2019.
- FIOREZE, A. P.; BUBEL, A. P. M.; CALLOU, A. É. P.; MENDONÇA, B. C. de S.; NUNES, C. M.; PINTO, C. G. A questão da água no nordeste. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, (et al.) **Agência Nacional de Águas**. Brasília, DF: CGEE, Capítulo – 1, p. 31-43, 2012.
- FREITAS, M. C.; SILVA, G. J.; SANTOS, L. S. Diversificação da agricultura e segurança alimentar: o papel das frutíferas nativas. **Agroecologia e Desenvolvimento Rural Sustentável**, v. 9, p. 45-56, 2018.
- GHAFAARI, H.; HASSANPOUR, H.; JAFARI, M.; BESHARAT, S. Effect of partial root zone irrigation on physiology, water use efficiency, fruit yield, phenolic compounds and antioxidant capacity of apple. **Archives of Agronomy and Soil Science**, v. 67, p.1521-1538, 2021.
- GHOSH, U. K.; SINGH, G.; SINGH, P.; SINGH, S. Proline, a multifaceted signalling molecule in plant responses to abiotic stress: understanding the physiological mechanisms. **Plant Biology**, v. 24, p. 227-239, 2022.
- GODAY, F.; OLIVOS-HERNÁNDEZ, K.; STANGE, C.; HANDFORD, M. Abiotic stress in crop species: improving tolerance by applying plant metabolites. **Plants**, v.10, e186, 2021.
- HAPP-KURZ, M. The influence of environmental stress on carotenoid and chlorophyll synthesis. **Plant Biology**, v. 22, p. 342-352, 2020.
- HAQUE, M. A.; SAKIMIN, S. Z. Planting arrangement and effects of planting density on tropical fruit crops-A Review. **Horticulturae**, v. 8, e485, 2022.
- HIRAKURI, M. **Impactos econômicos de estresses bióticos e abióticos na produção de soja**. 1. ed. Londrina, PR: Embrapa, 2014. 8 p. (Circular Técnica).
- HOSSAIN, A.; ALAM, M. N.; CHAN, Z.; SABAGH, A. E.; FAHAD, S.; HASANUZZAMAN, M. **Heat-induced oxidative stress in plants: consequences and survival mechanisms. In improving crop production in the era of climate change**. CRC Press, 2022. p. 41-70.

- IAL - Instituto Adolfo Lutz. **Métodos físico-químicos para análises de alimentos**. 4.ed. São Paulo: Instituto Adolfo Lutz, 2008. 1020p.
- IBGE. **Cadastro de Municípios localizados na região semiárido do Brasil**. Disponível em: Rio de Janeiro, disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 dez. 2021.
- IBGE. **Cadastro de Municípios localizados na região semiárido do Brasil**. Disponível em: Rio de Janeiro, disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 15 jun. 2022.
- JANGID, R.; MASU, M. M.; BHATTACHARJEE, P.; PATEL, B. D.; KUMAR, P. Effect of different sources of nitrogen on growth and yield attributes of custard apple (*Annona squamosa* L.) cv. Sindhan. **The Pharma Innovation**, v. 11, n. 5, p. 1477-1481, 2022.
- KALAPOPOS, T. Leaf water potential-leaf water deficit relationship for ten species of a semiarid grassland community. **Plant and Soil**, v. 160, p. 105-112, 1994.
- KAUR, H.; ASTHIR, B. Mechanisms of drought resistance in plants and drought tolerance improvement strategies. **Plant Science Today**, v. 7, p. 98-106, 2020.
- KHAN, F.; SIDDIQUE, A. B.; SHABALA, S.; ZHOU, M.; ZHAO, C. Phosphorus plays key roles in regulating plants' physiological responses to abiotic stresses. *Plants*, v. 12, e2861, 2023.
- KHAN, N.; SINGH, G.; SINGH, P.; IQBAL, M.; MALIK, Z.; IQBAL, S. Photosynthesis: genetic strategies adopted to gain higher efficiency. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 25, e 8933, 2024.
- KHANNA-CHOPRA, R.; KAUR, H. Plant responses to drought stress: role of proline as a signaling molecule. **Plant Signaling & Behavior**, v. 13, p.1573-1581, 2018.
- KISHOR, P. B. K.; HIMA KUMARI, P.; SUNITA, M. S. L.; SREENIVASULU, N. Role of proline in cell wall synthesis and plant development and its implications in plant ontogeny. **Frontiers in Plant Science**, v. 6, e544, 2015.
- KOU, X.; YANG, H.; WEI, X.; JIANG, J.; HUA, J. Responses of root system architecture to water stress at multiple levels: A meta-analysis of trials under controlled conditions. **Frontiers in Plant Science**, v. 13, p.1-16, 2022.
- LEMOS, E. P.de. A Produção de Anonáceas no Brasil. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p. 77-085, 2014.

- LICHTENTHALER, H. K.; BABANI, F. Contents of photosynthetic pigments and ratios of chlorophyll a/b and chlorophylls to carotenoids $(a+b)/(x+c)$ in C₄ plants as compared to C₃ plants. **Photosynthetica**, v. 60, p. 3-9, 2022.
- LIMA, G. S. de; SANTOS, J. B. dos; SOARES, L. A. dos A.; GHEYI, H. R.; NOBRE, R. G.; PEREIRA, R. F. Irrigação com águas salinas e aplicação de prolina foliar em cultivo de pimentão “All Big”. **Comunicata Scientiae**, v.7, p.513-522, 2016.
- LIMA, G. S.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. dos A.; AZEVEDO, C. A. V. de; LIMA, V. L. A. de Salinity and cationic nature of irrigation water on castor bean cultivation. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 22, p. 267-272, 2018.
- LIMA, R. A.; GOMES, T. M.; ALMEIDA, C. F. Nutritional and functional properties of *Annona squamosa* L. fruits. **Food Chemistry**, v. 307, p. 125-132, 2020.
- LIMA, G. S. de; SILVA, A. A. R. da; TORRES, R. A. F.; SOARES, L. A. dos A.; GHEYI, H. R.; SILVA, F. A. da; NOBRE, R. G.; AZEVEDO, C. A. V.; LOPES, K. P.; CHAVES, L. H. G.; LIMA, V. L. A. NPK accumulation, physiology, and production of sour passion fruit under salt stress irrigated with brackish water in the phenological stages and K fertilization. **Plants**, v. 12, p. 1-18, 2023.
- LIU, G.; YE, X.; HUANG, Z.; DONG, M.; CORNELISSEN, J. H. Leaf and root nutrient concentrations and stoichiometry along aridity and soil fertility gradients. **Journal of Vegetation Science**, v. 30, p. 291-300, 2019.
- LIU, H.; LI, H.; NING, H.; ZHANG, X.; LI, S.; PANG, J.; SUN, J. Optimizing irrigation frequency and amount to balance yield, fruit quality and water use efficiency of greenhouse tomato. **Agricultural Water Management**, v. 226, e105787, 2019.
- LIU, F.; ZHAO, Y.; MENG, Q.; WANG, P.; GAO, H. Role of Carotenoids in Photosynthetic Adaptation to Stress Conditions in Plants. **Frontiers in Plant Science**, v. 11, p. 567-580, 2020.
- LIU, Q.; SINGH, R. K.; JIN, L.; LEE, K. S.; PHAN, T. Rapid effects of salinity stress on carotenoid biosynthesis and antioxidant enzyme activity in tomato plants. **Scientia Horticulturae**, v. 289, e110426, 2021.
- LIU, X.; QUAN, W.; BARTELS, D. Stress memory responses and seed priming correlate with drought tolerance in plants: An overview. **Planta**, v. 255, e45, 2022.
- LOZANO-MONTAÑA, P. A.; SARMENTO, F.; SEQUEIRA, L. M.; FLÓREZ, F. Á.; MELGAREJO, L. M. Physiological, biochemical and transcriptional responses of

- Passiflora edulis* Sims f. *edulis* under progressive drought stress. **Scientia Horticulturae**, v. 275, p.1-10, 2021.
- LUCENA, C. Y. S.; SANTOS, D. J. R.; SILVA, P. L. S.; COSTA, E. D.; LUCENA, R. L. O reuso de águas residuais como meio de convivência com a seca no semiárido do Nordeste Brasileiro. **Revista de Geociências do Nordeste**, v. 4, p. 1-17, 2018.
- LUO, L.; ZHANG, Y.; XU, G. How does nitrogen shape plant architecture?. **Journal of Experimental Botany**, v. 71, p. 4415-4427, 2020.
- MAUREL, C.; NACRY, P. Root architecture and hydraulics converge for acclimation to changing water availability. **Nature plants**, v. 6, p. 744-749, 2020.
- MEDEIROS, R. M. de. Classificação Climática de Köppen para o Estado do Piauí - Brasil. **revista Equador**, v. 9, p. 82-99, 2020.
- MELO, R.; VOLTOLINI, T. V. **Agricultura familiar depende de chuva no semiárido**. Brasília: Embrapa, 2019.
- MENDES, R.; S. M. Princípios de fisiologia vegetal. In: Roselita Maria de Souza Mendes, Eliseu Marlônio Pereira de Lucena, Jeanne Barros Leal de Pontes Medeiros **Ciências Biológicas**. EDUCE - 2. - ed. Fortaleza: p. 126 il., 2015.
- MENDES, B. M.; SOUZA, V. F.; COSTA, D. S. Advances in the genetic improvement of *Annona* species. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 41, p. 13-21, 2019.
- NASCIMENTO, P. da C. **Cultivo de fruta-do-conde**. Dossiê Técnico, Instituto Euvaldo Lodi – IEL/BA, p. 1-24, 2012.
- NUNES, S. H. P.; DANTAS NETO, J.; SILVA, P. F. da; SANTOS, E. G. dos; MATOS, R. M. de. Indicadores de vulnerabilidade da seca e avaliação da governança de 1991-2010 no semiárido Paraibano. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 11, p. 210-228, 2020.
- OLIVEIRA, A.; CASTELLANI, M. A.; NASCIMENTO, A. S.; MOREIRA, A. A. Perfil do sistema de produção de pinha nos polos de fruticultura da Bahia, com ênfase nos aspectos fitossanitários da cultura. **Extensão Rural**, v. 23, e95, 2016.
- OLIVEIRA, E. C.; CUNHA, F. F.; OLIVEIRA, R. A.; MARTINS, J. A. Evaluation of irrigation management in banana plantations. **Agricultural Water Management**, v. 242, p. 106-112, 2020.
- PEREIRA, M. C. T.; NIETSCHE, S.; SANTOS, F. S.; XAVIER, A. A.; CUNHA, L. D. M. V. D.; NUNES, C. F.; SANTOS, F. A. Efeito de horários de polinização artificial no pegamento e qualidade de frutos de pinha (*Annona squamosa* L.). **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 25, p. 203-205, 2003.

- PÉREZ-ÁLVAREZ, Eva P.; GIL-MUÑOZ, R.; MARTÍNEZ-CUTILLAS, A.; MELGAREJO, P.; GARCÍA-MARTÍNEZ, S. Effects of water deficit irrigation on phenolic composition and antioxidant activity of Monastrell grapes under semiarid conditions. **Antioxidants**, v. 10, e1301, 2021.
- POGGIOLESI, G.; LOMBARDI, L.; LORENZINI, G.; PELLEGRINI, E. Physiological responses to abiotic stress: the role of antioxidants in plant tolerance. **Journal of Experimental Botany**, v. 67, p. 563-572, 2016.
- RAWAT, N.; SINGLA-PAREEK, S. L.; PAREEK, A. Membrane dynamics during individual and combined abiotic stresses in plants and tools to study the same. **Physiologia Plantarum**, v. 171, p. 653-676, 2021.
- ROZANE, D. E.; NATALE, W. Calagem, adubação e nutrição mineral de anonáceas. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v. 36, p.166-175, 2014.
- SÁNCHEZ-MOREIRAS, A. M.; REIGOSA, M. J.; SANZ, M.; GONZÁLEZ, L. Imaging of chlorophyll a fluorescence in natural compound-induced stress detection. **Frontiers in Plant Science**, v.11, e583590, 2020.
- SANTOS, W. M. do; SOUZA, E. S. de; ALMEIDA, A. Q. de; ANTONINO, A. C. D. Variabilidade espacial da sazonalidade da chuva no semiárido brasileiro. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v. 2, p. 368-376, 2017.
- SANTOS, A. L.; SILVA, J. P.; SOARES, R. M. Evaluation of antioxidant properties of *Annona squamosa* L. fruits. **Journal of Food Science**, v. 83, p.1234-1240, 2018.
- SANTOS, C. C.; SCALON, S. de P. Q. **Ecofisiologia e Nutrição de Espécies Frutíferas e Arbóreas**. Pantanal, Belo horizonte: Pantanal Editora, 2020. 150p.
- SANTOS, F. DE A.; BRITO DA CRUZ, M. L.; SILVEIRA MENDES, L. M. Vulnerabilidade socioespacial a secas e a inundações na Sub-bacia Hidrográfica do rio Piracuruca (Ceará-Piauí). **Sociedade & Natureza**, v. 32, p. 321-334, 11, 2020.
- SANTOS, L. F.; LIMA, G. S. de; LIMA, V. L. de; SILVA, A. A. da; FÁTIMA, R. T. de; ARRUDA, T. F. de L.; CAPITULINO, J. D. Proline on the induction of tolerance of sour passion fruit seedlings to salt stress. **Revista Caatinga**, v.37, e12048, 2024.
- SCALON, S. de P. Q.; MUSSURY, R. M.; EUZÉBIO, V. L. de M.; KODAMA, F. M.; KISSMANN, C. Estresse hídrico no metabolismo e crescimento inicial de mudas de mutambo (*Guazuma ulmifolia* Lam.). **Ciencia Florestal**, v. 21, p. 655-662, 2011.
- SCHOLANDER, P. F.; HAMMEL, H. T.; HEMINGSEN, E. A.; BRADSTREET, E. D. Hydrostatic pressure and osmotic potentials in leaves of mangroves and some other plants. **Proceedings of National Academy Science**, v. 52, p. 119-125, 1965.

- SCOTTI-CAMPOS, P.; PHAM-THI, A. T.; SEMEDO, J. N.; PAIS, I. P.; RAMALHO, J. C.; MATOS, M. C. Physiological responses and membrane integrity in three vigna genotypes with contrasting drought tolerance. **Emirates Journal of Food and Agriculture**, v. 25, p. 1002-1013, 2013.
- SHAH, S. H.; ISLAM, S.; MOHAMMAD, F. Sulphur as a dynamic mineral element for plants: A review. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 22, p. 2118-2143, 2022.
- SIDDIQUE, A.; KANDPAL, G.; KUMAR, P. Proline accumulation and its defensive role under diverse stress condition in plants: An overview. **Journal of Pure and Applied Microbiology**, v. 12, p. 1655-1659, 2018.
- SILVA, A. Q.; SILVA, H. **Nutrição e adubação de anonáceas**. In: SÃO JOSÉ, A. B. (Ed.). Anonáceas: produção e mercado (pinha, graviola, atemóia e cherimólia). Vitória da Conquista: DFZ/UESB, 1997. cap. 17, p. 118-137.
- SILVA, M. D. A. Adaptação das plantas ao déficit hídrico. **Acta Iguazu**, v. 5, p. 15-32, 2017.
- SILVA, C. P. da; ONO, E. O.; RODRIGUES, J. D.; CORRÊA, L. de S.; BOLIANI, A. C. Enraizamento de estacas apicais de pinheira, gravioleira e atemoeira tratadas com auxinas. **Revista Agraria Academica**, v. 2, p. 143-156, 2019.
- SILVA, M. A.; CUNHA, J. L.; NASCIMENTO, R. D. Drip irrigation and fertigation management in fruit crops. **Irrigation Science**, v. 37, p. 305-318, 2019.
- SILVA, F. de A. da; PEREIRA, F. H. F.; CAMPOS JÚNIOR, J. E.; NÓBREGA, J. S.; DIAS, M. dos S. Aplicação foliar de prolina no crescimento e fisiologia do milho verde cultivado em solo salinizado. **Colloquium Agrariae**, v. 16, p. 23-34, 2020a.
- SILVA, L. D. R.; CARTAXO, P. H. A.; SILVA, M. C.; GONZAGA, K. S.; ARAÚJO, D. B.; SOUSA, E. S.; SANTOS, J. P. O. Effect of rainfall variability on the production of *Vigna unguiculata* (L.) Walp. in the semi-arid region of Paraíba. **Scientific Electronic Archives**, v. 13, e26, 2020b.
- SIMIONATTO, H. H.; CARVALHO, S. L. de. Análise das concentrações de nitrogênio, fósforo e sólidos totais presentes na água do Córrego do Galante – SP. **Revista de Tecnologia & Gestão Sustentável**, v.1, p. 65-73, 2022.
- SOROORI, S.; DANAEI, E.; HEMMATI, K.; MOGHADAM, A. L. Effect of foliar application of proline on morphological and physiological traits of calendula officinalis l. under drought stress. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.25, p.40-46, 2021.

- SOUZA, M. T. de C.; SILVA, M. E. F.; PAULO, P. F. M. de; RIBEIRO, A. B.; ANDRADE, A. P. de. Caracterização climática e o efeito do estresse hídrico sob as plantas nativas da caatinga. **Pubvet**, v. 8, e1655, 2014.
- SOUZA, H. N.; CUNHA, M. F.; FRANCO, A. A. Adubação orgânica e manejo da fertilidade do solo na produção de frutíferas. **Ciência Rural**, v. 46, p.723-731, 2016.
- SOUZA, B.; SOUZA, I.; PEREIRA, O. Aspectos morfológicos de *Annona squamosa* L. (Annonaceae) sob influência de diferentes processos de superação de dormência. **Enciclopédia Biosfera**, v. 15, p. 107-114, 2018.
- SOUZA, L. de P.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; FÁTIMA, R.T. de; LIMA, G. S. de; DINIZ, G. L. Índices fisiológicos e crescimento de porta-enxertos de cajueiro sob estresse salino e concentrações de prolina. **Irriga**, v.1, p.169-183, 2021.
- STROHECKER, R.; HENINING, H. M. **Análisis de vitaminas: métodos comprobados**. Madrid: Paz Montalvo, 1967. 42 p.
- SUEKAWA, M.; FUJIKAWA, Y.; ESAKA, M. Exogenous proline has favorable effects on growth and browning suppression in rice but not in tobacco. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 142, p. 1-7, 2019.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E.; MOLLER, I. M.; MURPHY, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6.ed. Porto Alegre: ArtMed, 2017. 888p.
- TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de métodos de análise de solo**. 3.ed. Brasília, 2017. 574p.
- TONHATI, R.; MELLO, S. C.; MOMESSO, P.; PEDROSO, R. M. L-proline alleviates heat stress of tomato plants grown under protected environment. **Scientia Horticulturae**, v. 268, e109370, 2020.
- TORRES, R. A. F.; LIMA, G. S. de; PAIVA, F. J. S.; SOARES, L. A. dos A.; SILVA, F. A.; SILVA, L. A.; OLIVEIRA, V. K. N.; MENDONÇA, A. J. T.; ROQUE, I. A.; SILVA, S. T. A. Physiology and production of sugar-apple under water stress and application of proline. **Brazilian Journal of Biology**, v. 83, e273404, 2023.
- VALE, N. M. do; BARILI, L. D.; SIMON, R. D.; MEIRELLES, C. J. L.; GUIDOLIN, A. F.; MARINI, K. M. Avaliação para tolerância ao estresse hídrico em feijão. **Biotemas**, v. 25, e3, 2012.
- VERDE -GO, R. Anais do I Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão-II Seminário de Pós-Graduação da Universidade de Rio Verde. Congresso de Ensino, Pesquisa e Extensão - II Seminário de Pós-Graduação da Universidade de Rio Verde, v.2, p.198, 2019.

- WANG, Y.; ZHAO, B.; LI, J.; HOU, W.; YANG, Y.; WEI, J. Carotenoid Metabolism and Regulation in Horticultural Crops. **Horticultural Research**, v. 8, p. 232-245, 2021.
- WANG, Z.; YANG, Y.; YADAV, V.; ZHAO, W.; HE, Y.; ZHANG, X.; WEI, C. A prolina induzida pela seca é sintetizada principalmente nas folhas e transportada para as raízes na melancia sob déficit hídrico. **Jornal de Plantas Hortícolas**, v.8, p.615-626, 2022.
- WEATHERLEY, P. E. Studies in the water relations of the cotton I: The field measurements of water deficits in leaves. **New Phytologist**, v. 49, p. 81-97, 1950.
- ZAHEDI, S. M.; KARIMI, M.; VENDITTI, A. Plants adapted to arid areas: specialized metabolites. **Natural Product Research**, v.35, p.3314-3331, 2021.
- ZHANG, J.; LEE, T.; YANG, L.; KIM, H.; LEE, J.; CHOI, G. Physiological and biochemical responses of plants to water deficit. **Plant Physiology**, v.180, p. 943-953, 2019.
- ZHANG, H.; ZHU, J. K. Understanding the Effects of salinity on plant growth and metabolism. **Annual Review of Plant Biology**, v. 71, p. 201-226, 2020.
- ZUAZO, V. H. D.; GARCÍA-TEJERO, I. F.; RODRÍGUEZ, B. C.; TARIFA, D. F.; RUIZ, B. G.; SACRISTÁN, P. C. Deficit irrigation strategies for subtropical mango farming. A review. **Agronomy for Sustainable Development**, v. 41, e13, 2021.
- ZUCOLOTO, M.; SCHMILDT, E. R.; COELHO, R. I. **Fruticultura Tropical: diversificação e consolidação** – Alegre, ES: CAUFES, 186p.: il. 2015.
- ZULFIQAR, F.; AKRAM, N. A.; ASHRAF, M. Osmoprotection in plants under abiotic stresses: new insights into a classical phenomenon. **Planta**, v. 251, e3, 2020.