



**Universidade Federal de Campina Grande
Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
Pós - Graduação em Engenharia Agrícola
Área de Concentração em Irrigação e Drenagem**



TESE

RIGOBERTO MOREIRA DE MATOS

**FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E PEGADA HÍDRICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

**CAMPINA GRANDE - PB
SETEMBRO DE 2020**

RIGOBERTO MOREIRA DE MATOS

**FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E PEGADA HÍDRICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola 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, Área de Concentração em Irrigação e Drenagem.

Área de Concentração:

Engenharia de Irrigação e Drenagem

Orientador:

Prof. Dr. José Dantas Neto – UAEEA/CTRN/UFCG

Co-orientador:

Prof. Dr. Luciano Marcelo Fallé Saboya – UAEEA/CTRN/UFCG

CAMPINA GRANDE - PB

SETEMBRO DE 2020

M433f Matos, Rigoberto Moreira de.
 Função de produção e pegada hídrica da palma forrageira sob lâminas
 de irrigação e adubação nitrogenada / Rigoberto Moreira de Matos. -
 Campina Grande, 2020.
 83f. : il.

 Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de
 Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2020.
 "Orientação: Prof. Dr. José Dantas Neto, Prof. Dr. Luciano Marcelo
 Fallé Saboya".
 Referências.

 1. Cactácea. 2. Produtividade. 3. Análise Econômica. 4.
 Componentes Verde, Azul e Cinza. I. Dantas Neto, José. II. Saboya,
 Luciano Marcelo Fallé. III. Título.

CDU 582.661.56(043)



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



PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE

RIGOBERTO MOREIRA DE MATOS

FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E PEGADA HÍDRICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB
LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

Aprovado em 03 de Setembro de 2020

Banca Examinadora

José Dantas Neto

Dr. José Dantas Neto – UAEA/CTRN/UFCA

(Orientador)

Luciano Marcelo Fallé Saboya

Dr. Luciano Marcelo Fallé Saboya – UAEA/CTRN/UFCA

(Co-orientador)

Vera Lúcia Antunes de Lima

Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima – UAEA/CTRN/UFCA

(Examinadora Interna)

Maria Sallydelândia Sobral de Farias

Dra. Maria Sallydelândia Sobral de Farias – UAEA/CTRN/UFCA

(Examinadora Interna)

Patrícia Ferreira da Silva

Dra. Patrícia Ferreira da Silva – PPGRN/CTRN/UFCA

(Examinadora Externa)

Arsênio Pessoa de Melo Júnior

Dr. Arsênio Pessoa de Melo Júnior – IF Sertão-PE

(Examinador Externo)

DEDICATÓRIA

A Deus, por me conceder o dom da vida e forças para a realização deste sonho.

A meus pais, Cícera Moreira de Matos e Roberto Moreira de Matos.

Dedico

*“Querem a tua colheita,
Mas não querem plantar o que você plantou”
(Josué Brandão).*

AGRADECIMENTOS

A Deus, por está sempre comigo.

A minha família, pelo apoio e incentivo: meu pai, Roberto Moreira de Matos, minha mãe, Cícera Moreira de Matos, meus irmãos, Rodrigo Moreira de Matos, Cicêfran Moreira de Matos e Robério Moreira de Matos e a minha sobrinha, Ana Isabelly Matos, que sempre me ajudaram na batalha em prol da concretização deste sonho.

À Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, ao Centro de Tecnologia e Recursos Naturais - CTRN e à Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola - UAEA, pela formação acadêmica, forma calorosa de acolhimento e condução educacional.

Ao professor José Dantas Neto, pela orientação, paciência e principalmente compreensão.

À companheira Patrícia Ferreira da Silva, por sua amizade, paciência, motivação e compreensão.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos durante o período do curso de pós-graduação.

Aos meus colegas de batalha, Antônio Suassuna de Lima, Vitória Ediclécia Borges e Thiago Galvão Sobrinho, pelo companheirismo, auxílio e motivação.

A todas aquelas pessoas que contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização do meu curso de pós-graduação, nas pesquisas de trabalhos científicos e na tese.

Meus eternos agradecimentos.

SUMÁRIO

SUMÁRIO DE TABELAS	I
SUMÁRIO DE FIGURAS	II
RESUMO GERAL	III
GENERAL SUMMARY	IV
1. INTRODUÇÃO GERAL	1
2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	2
3. OBJETIVOS.....	4
3.1. Objetivo geral	4
3.2. Objetivos específicos.....	4
4. CAPÍTULO I	
4.1. DESEMPENHO DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA E NITROGÊNIO NO SOLO	5
4.2. INTRODUÇÃO	7
4.3. MATERIAL E MÉTODOS	8
4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	13
4.5. CONCLUSÕES.....	30
4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	30
5. CAPÍTULO II	
5.1. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA.....	35
5.2. INTRODUÇÃO	37
5.3. MATERIAL E MÉTODOS	38
5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	44
5.5. CONCLUSÕES.....	56
5.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
6 CAPÍTULO III	
6.1. PEGADA HÍDRICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB FERTIRRIGAÇÃO NITROGENADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO.....	60
6.2. INTRODUÇÃO	62
6.3. MATERIAL E MÉTODOS	63
6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	69
6.5. CONCLUSÕES.....	79
6.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79

SUMÁRIO DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo do experimento.....	8
Tabela 2. Quantidade de água aplicada no cultivo da palma forrageira através das lâminas de irrigação mais precipitação efetiva aos 12 e 18 MAP.	13
Tabela 3. Resumo da análise de variância para a variável espessura de cladódios (EC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).	14
Tabela 4. Resumo da análise de variância para a variável área de cladódios (AC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).	17
Tabela 5. Resumo da análise de variância para a variável número de cladódios por planta (NC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).	20
Tabela 6. Resumo da análise de variância para a variável produtividade de massa verde (PMV) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).	23
Tabela 7. Resumo da análise de variância para a variável produtividade da água (PA) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).	26

CAPÍTULO II

Tabela 1. Lâmina total de água aplicada no cultivo da palma forrageira determinada em função das lâminas de irrigação mais precipitação efetiva aos 12 MAP.	44
Tabela 2. Resumo da análise de variância para a produtividade de massa verde da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 MAP.	46
Tabela 3. Lâmina total de água que maximizam a produtividade (LIm), produtividade de massa verde máxima (PMVm), custo parcial (C_0), custo total (C_T) receita líquida (R_L), valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e razão benefício custo (RBC).	51

CAPÍTULO III

Tabela 1. Agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira.	67
Tabela 2. Taxa de aplicação dos agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira.	73
Tabela 3. Fatores que influenciam o potencial da vazão de lixiviação dos agrotóxicos.	74
Tabela 4. Valores e pesos dos agrotóxicos, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo.	75
Tabela 5. Pegada hídrica cinza devido à exploração agrícola, de cada agrotóxico utilizado em um hectare cultivado com palma forrageira.	76
Tabela 6. Pegada hídrica total verde, azul e cinza da palma forrageira cultivada sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.	78

SUMÁRIO DE FIGURAS

CAPÍTULO I

- Figura 1. Espessura de cladódios (EC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas $P < 0,05$ pelo Teste F. 15
- Figura 2. Área de cladódios (AC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas $P < 0,05$ pelo Teste F. 18
- Figura 3. Número de cladódios por planta (NC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas $P < 0,05$ pelo Teste F. 21
- Figura 4. Produtividade de massa verde (PMV) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas a $P < 0,05$ pelo Teste F. 24
- Figura 5. Produtividade da água (PA) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas $P < 0,05$ pelo Teste F. 27
- Figura 6. Eficiência de uso do nitrogênio extraído (EUNE) da palma forrageira Orelha (A), Baiana (B) e Miúda (C) em função dos níveis de nitrogênio aos 12 MAP..... 29

CAPÍTULO II

- Figura 1. Produtividade da cultivar de palma forrageira Orelha (kg ha^{-1}) em função da lâmina total de água (irrigação + precipitação efetiva) dentro dos níveis de nitrogênio de 300 e 600 kg ha^{-1} 49
- Figura 2. Produtividade da cultivar de palma forrageira Baiana (kg ha^{-1}) em função da lâmina total de água (irrigação + precipitação efetiva) dentro dos níveis de nitrogênio de 150, 300 e 450 kg ha^{-1} 50
- Figura 3. Receita líquida ($\text{R\$ ha}^{-1}$) da palma forrageira Orelha (A) e Baiana (B) em função da lâmina total de água que maximiza a produtividade, dos níveis de nitrogênio e de diferentes cenários de preços para a venda da massa verde. 55

CAPÍTULO III

- Figura 1. Pegada hídrica verde para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHVO), Baiana (PHVB) e Miúda (PHVM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *, ** Significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente. 70
- Figura 2. Pegada hídrica azul para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHAO), Baiana (PHAB) e Miúda (PHAM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *, ** Significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente. 72
- Figura 3. Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHCO), Baiana (PHCB) e Miúda (PHCM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *, ** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente. 77

RESUMO GERAL

A análise econômica e a pegada hídrica são importantes para o conhecimento da quantidade de insumos utilizados nos cultivos, e assim, para determinar a quantidade ótima econômica visando o aumento da receita e diminuição dos impactos ambientais. Objetivou-se com este estudo determinar a função de produção e pegada hídrica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada. O experimento foi conduzido em condições de campo no município de Santa Luzia - PB. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso e esquema fatorial 5 x 5, sendo cinco lâminas de irrigação - LI (25, 50, 75, 100 e 125% da ET_0), cinco níveis de nitrogênio - NN (0, 150, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Esse delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante, Baiana e Miúda). Avaliou-se: espessura, área e número de cladódios; produtividade de massa verde e da água; uso eficiente do nitrogênio; função de produção, lâmina que maximiza a produção, produtividade máxima, análise econômica e pegada hídrica das cultivares estudada. A LI de 125% da ET_0 teve maior influência sobre as variáveis analisadas das cultivares Orelha e Baiana. Os NN maior que 300 kg ha⁻¹ proporcionaram máximo desempenho da palma forrageira em crescimento e rendimento. A produtividade da Orelha de elefante (680,0 t ha⁻¹) e Baiana (647,7 t ha⁻¹) foram superiores na colheita aos 12 MAP; para a Miúda a maior produtividade (254,0 t ha⁻¹) foi obtida na colheita aos 18 MAP. O aumento da disponibilidade de água e nitrogênio no solo favoreceu o crescimento e produtividade da palma forrageira. A produção de palma forrageira irrigada e adubada no semiárido é uma atividade promissora e economicamente viável. As ferramentas utilizadas para definição da viabilidade do cultivo de palma forrageira possibilitam a verificação da viabilidade do investimento, pois apresentam valor presente líquido e taxa interna de retorno positivas. A lâmina total de água que maximiza a produtividade (779,0 mm) associada a maior dose de nitrogênio (600 kg ha⁻¹) resultou em maior produtividade, obtendo-se maior receita líquida e melhor razão benefício custo na cultivar Orelha de Elefante. O menor consumo foi de água azul (13,3 m³ t⁻¹), seguido de água verde (24,2 m³ t⁻¹), sendo o maior consumo de água cinza (31,1 m³ t⁻¹). O aumento no NN aplicado reduziu a pegada hídrica verde, azul e cinza das cultivares de palma forrageira. O acréscimo na LI diminuiu a pegada hídrica verde e cinza, e aumentou a azul. A cultivar Orelha de Elefante propiciou a menor pegada hídrica verde, azul e cinza. A pegada hídrica da palma forrageira irrigada e adubada é a menor encontrada na literatura, evidenciando o grande potencial dessa forrageira para regiões com pouca disponibilidade de água.

Palavras-chave: cactácea, produtividade, análise econômica, componentes verde, azul e cinza.

GENERAL SUMMARY

Economic analysis and water footprint are important for understanding the amount of inputs used in crops, and thus, to determine the optimal economic amount with a view to increasing revenue and reducing environmental impacts. The objective of this study was to determine the production function and water footprint of the forage palm under irrigation depths and nitrogen fertilization. The experiment was carried out under field conditions in the municipality of Santa Luzia - PB. The experimental design was in randomized blocks and a 5 x 5 factorial scheme, with five irrigation levels - LI (25, 50, 75, 100 and 125% of ET_0), five levels of nitrogen - NN (0, 150, 300, 450 and 600 kg ha⁻¹ of N) and three replications. This design was used for three cultivars of forage palm (Elephant Ear, Baiana and Miúda. It was evaluated: thickness, area and number of cladodes; green mass and water productivity; efficient use of nitrogen; production function, blade that maximizes production, maximum productivity, economic analysis and water footprint of the studied cultivars. The LI of 125% of ET_0 had the greatest influence on the variables analyzed for the cultivars Orelha and Baiana. NN greater than 300 kg ha⁻¹ provided maximum performance of the forage palm in growth and yield. The productivity of Elephant ear (680.0 t ha⁻¹) and Baiana (647.7 t ha⁻¹) were higher in the harvest than 12 MAP; for Miúda the highest productivity (254.0 t ha⁻¹) was obtained at harvest at 18 MAP. The increased availability of water and nitrogen in the soil favored the growth and productivity of the forage palm. The production of irrigated and fertilized forage palm in the semiarid region is a promising and economically viable activity. The tools used to define the viability of the cultivation of forage palm make it possible to verify the viability of the investment, as they present positive net present value and internal rate of return. The total water layer that maximizes productivity (779.0 mm) associated with a higher dose of nitrogen (600 kg ha⁻¹) resulted in greater productivity, obtaining greater net revenue and better cost benefit ratio in the cultivar Orelha de Elefante. The lowest consumption was blue water (13.3 m³ t⁻¹), followed by green water (24.2 m³ t⁻¹), with the highest consumption of gray water (31.1 m³ t⁻¹). The increase in applied NN reduced the green, blue and gray water footprint of forage palm cultivars. The increase in LI decreased the green and gray water footprint and increased the blue one. The cultivar Orelha de Elefante provided the smallest green, blue and gray water footprint. The water footprint of the irrigated and fertilized forage palm is the smallest found in the literature, showing the great potential of this forage for regions with little water availability.

Keywords: cactacea, productivity, economic analysis, green, blue and gray components.

1. INTRODUÇÃO GERAL

O principal objetivo do cultivo de uma espécie agrícola é o lucro, assim, os recursos disponíveis para o processo produtivo, devem ser utilizados racionalmente, de forma a garantir os mais elevados níveis de rentabilidade econômica (DANTAS et al., 2017). Para Silva et al. (2020), os insumos água e nitrogênio merecem destaque no cultivo de palma forrageira, não só em função do custo de produção e funções vitais que exercem, mas, nomeadamente, pela necessidade em utilizar água e o nitrogênio de forma eficiente, ou seja, racional, permitindo assim, a sustentabilidade tanto hídrica quanto nutricional na região semiárida.

Teodoro et al. (2013) afirmam que, a resposta produtiva dos cultivos agrícolas ao uso de diferentes lâminas de irrigação depende de diversos fatores, dentre eles, as condições meteorológicas locais e as características dos solos como pH, composição química e teor de matéria orgânica, especialmente, essa última, por ser a principal fonte de ácidos húmicos e nitrogênio. Segundo Taiz & Zaiger (2016), o nitrogênio propicia a emissão de cladódios de palma, em virtude de ser um nutriente que estimula a divisão celular da planta.

Já Cunha et al. (2012), ao estudarem a morfometria e o acúmulo de biomassa em palma forrageira sob doses de nitrogênio também, observaram que o nitrogênio favorece de maneira positiva, o número de cladódios de palma, conseqüentemente, estimula o aumento da produtividade da cultura. Os pesquisadores Oliveira et al. (2016) relatam que, a economia dos insumos está atrelada à utilização de níveis ótimos de água e nitrogênio que proporcionem melhor o crescimento e desenvolvimento das plantas, resultando em maiores índices de produtividade.

As maiores produtividades de palma forrageira, no ambiente semiárido, que por natureza possui irregularidades pluviométricas e solos rasos, só são obtidas quando se tem eficiência no uso da água e do nitrogênio, que só é possível quando se tem o manejo eficiente desses insumos (SILVA et al., 2020; SILVA & AZEVEDO, 2020; CÂNDIDO et al., 2013).

Lira et al. (2017) dizem que, a palma forrageira se destaca como umas das plantas com maior potencial de cultivo e produção nas condições semiáridas, sendo uma das bases da alimentação animal na região, principalmente, na época da estiagem. O potencial é fomentado devido ao hábito xerófito e ao metabolismo ácido das crassuláceas (MAC), que resulta no fechamento dos estômatos durante o dia e abertura a noite com a fixação de CO₂. Dessa forma, a cactácea consegue alta eficiência no uso da água, sendo muito indicada para o cultivo nas zonas secas do Nordeste (RAMOS et al., 2017).

Silva et al. (2012) e Ramos et al. (2017) mencionam que, os crescentes aumentos da demanda de água nos cultivos agrícolas, exigem o aperfeiçoamento de técnicas utilizadas nos sistemas de produção, que permitam a redução do volume dos insumos aplicados, em especial a água, sendo que a utilização de espécies de elevada eficiência de uso da água torna-se uma das ferramentas para superar a escassez hídrica (SILVA et al., 2020).

Nos últimos anos, outras metodologias têm sido aplicadas, buscando caracterizar, mapear e acompanhar a evolução da escassez hídrica mundial, o que possibilita registrar a diferença entre a disponibilidade e a demanda de água (HOEKSTRA et al., 2012). Dentre eles, a técnica de maior relevância é a Pegada Hídrica (PH), que trata do consumo de água, além de ser uma ferramenta que permite monitorar os efeitos da escassez em uma determinada região geográfica, possibilitando seu uso também como instrumento de avaliação na gestão dos recursos hídricos (HOEKSTRA et al., 2012; GIACOMIN & OHNUMA, 2012).

Em relação ao cultivo de palma forrageira, na literatura mundial, ainda são incipientes os trabalhos de pesquisa envolvendo função de produção e pegada hídrica com a utilização de lâminas de irrigação e adubação nitrogenada, necessitando, portanto, de maiores informações sobre os níveis ideais de aplicação de tais insumos para a cultura, assim como, o volume de água total utilizado durante a produção.

2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cândido, M.J.D.; Gomes, G.M.F.; Lopes, M.N.; Ximenes, L.J.F. **Cultivo de palma forrageira para mitigar a escassez de forragem em regiões semiáridas**. Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 7p. (BNB. Informe Rural, ano VII, n.3, 2013).
- Cunha, D. N. F. V.; Gomes, E. S.; Martuscello, J. A.; Amorim, P. L.; Silva, C. R.; Ferreira, P. S. Morfometria e acúmulo de biomassa em palma forrageira sob doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Saúde Produção Animal**, v.13, n.4, p.1156- 1165, 2012.
- Dantas, S. F A.; Lima, G. F. C.; Mota, E. P. Viabilidade econômica da produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido Potiguar. **Revista iPecege**, v.3, n.1, p.59-74, 2017.
- Giacomin, G.S.; Ohnuma, A.A. Análise de resultados de pegada hídrica por países e produtos específicos. **Rev. Elet. em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v.8, n.8, p.1562-1572, 2012.
- Hoekstra, A.Y. et al. Global monthly water scarcity: blue water footprints versus blue water availability. **PLoS One**, v.7, p. 32688, 2012.

- Lira, M, Santos, M e Dias, F 2017, 'Histórico e Importância da palma', In: M Lira (ed.), **Palma Forrageira: Cultivo e Usos** (Caderno 7), Conselho Regional de Engenharia e Agronomia de Pernambuco, Pernambuco, PE.
- Oliveira, E. C.; Carvalho, J. A.; Rezende, F. C.; Almeida, E. F. A.; Reis, S. N.; Mimura, S. N. Lâminas de irrigação e doses de nitrogênio em roseiras cultivadas com técnicas de produção integrada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 10, n. 4, p. 820-829, 2016.
- Ramos, J.; Souza, J.; Santos, E.; Pimenta Filho, Ribeiro, O. 'Crescimento e Produtividade de *Nopalea Cochenillifera* em função de diferentes densidades de plantio em cultivo com e sem capina', **Revista Electrónica de Veterinária**, v.18, n.8, p.1-12, 2017.
- Silva, F. J. B. C.; Azevedo, J. R. G. Temporal trend of drought and aridity indices in semi-arid pernambucano to determine susceptibility to desertification. **Brazilian Journal of Water Resources**, v. 25, e32, 2020.
- Silva, P. F.; Matos, R. M.; Dantas Neto, J.; Borges, V. E.; Galvão Sobrinho, Thiago; Bonou, S. I.; Azevedo, C. A. V.; Lima, V. L. A.; Melo Junior, A. P. Water and nitrogen water use efficiency in forage palm irrigated with salt water in the Neossolo. **Australian journal of crop science**, v.14, n.4, p.683-690. 2020.
- Silva, T. D. et al. Requerimento hídrico e coeficiente de cultura da cana-de-açúcar irrigada no semiárido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.64-71, 2012.
- Taiz, L.; Zieger, E. **Fisiologia vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2016. 719p.
- Teodoro, I.; Dantas Neto, J.; Souza, J. L.; Lyra, G. B.; Brito, K. S.; Sá, L. A.; Santos, M. A. L.; Sarmiento, P. L. V. S. Isoquantas de produtividade da cana – de – açúcar em função de níveis de irrigação e adubação nitrogenada. **Irriga**, v.18, n.3, p.387-401, 2013.

3. OBJETIVOS

3.1. Objetivo geral

Esse estudo objetivou-se determinar a função de produção e pegada hídrica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada no semiárido brasileiro.

3.2. Objetivos específicos

Avaliar o desempenho da palma forrageira em diferentes níveis de água e nitrogênio no solo.

Determinar a função de produção e a análise econômica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada cultivada no semiárido brasileiro.

Determinar a pegada hídrica verde, azul e cinza da palma forrageira com fertirrigação nitrogenada no semiárido brasileiro.

4. CAPÍTULO I

4.1. DESEMPENHO DA PALMA FORRAGEIRA SOB DIFERENTES NÍVEIS DE ÁGUA E NITROGÊNIO NO SOLO

RESUMO

O desempenho da palma forrageira no semiárido brasileiro limita-se em função das condições de água e nutrientes no solo, contudo, o fornecimento de água e fertilizantes através da fertirrigação, pode fornecer incrementos significativos no rendimento dessa cultura. Assim, objetivou-se com este estudo, avaliar o desempenho da palma forrageira sob diferentes níveis de água e nitrogênio, no solo do semiárido brasileiro. O experimento foi conduzido em condições de campo no município de Santa Luzia - PB, entre maio de 2015 e dezembro de 2016. Com o delineamento experimental em blocos ao acaso e esquema fatorial 5 x 5, sendo cinco lâminas de irrigação - LI (25, 50, 75, 100 e 125% da ET_0), cinco níveis de nitrogênio - NN (0, 150, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Esse delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante, Baiana e Miúda). Aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP), avaliou-se a espessura, a área e o número de cladódios; a produtividade de massa verde e da água; e o uso eficiente do nitrogênio extraído aos 12 MAP. A LI de 125% da ET_0 teve maior influência sobre as variáveis analisadas das cultivares Orelha e Baiana. O máximo rendimento obtido para a cultivar Miúda ocorreu por meio da LI de aproximadamente 75% da ET_0 . Os NN aplicados acima de 300 kg ha⁻¹ proporcionaram máximo desempenho da palma forrageira em crescimento e produtividade. A produtividade de massa verde da Orelha de elefante (680,0 t ha⁻¹) e Baiana (647,7 t ha⁻¹) foram superiores na colheita aos 12 MAP; para a Miúda (254,0 t ha⁻¹) na colheita aos 18 MAP. A Orelha de Elefante resultou em alta produtividade da água de 93,3 kg de massa verde por m⁻³ de água e, extraiu a maior quantidade de nitrogênio 390,6 kg ha⁻¹. A Baiana produziu a maior quantidade de massa verde em função do nitrogênio extraído, com eficiência de uso do nitrogênio extraído de 1893,7 kg de massa verde por kg⁻¹ de nitrogênio extraído. O aumento da disponibilidade de água e nitrogênio no solo favoreceu o crescimento e produtividade da palma forrageira no semiárido do Brasil. Por isso, recomenda-se ao produtor rural cultivar a palma forrageira Orelha de elefante irrigando com 125% da ET_0 e fertilizando com 600 kg ha⁻¹ de N para obtenção de maior número de cladódios e produtividade de massa verde.

PALAVRAS-CHAVE: *Opuntia* spp., *Nopalea* spp., água fertilizada, produtividade.

PERFORMANCE OF FORAGE PALM UNDER DIFFERENT LEVELS OF WATER AND NITROGEN IN THE SOIL

ABSTRACT

The performance of forage palm in the Brazilian semiarid is limited due to the conditions of water and nutrients in the soil, however, the supply of water and fertilizers through fertigation can provide significant increases in the yield of this crop. Thus, the objective of this study was to evaluate the performance of the forage palm under different levels of water and nitrogen, in the soil of the Brazilian semiarid region. The experiment was conducted under field conditions in the municipality of Santa Luzia - PB, between May 2015 and December 2016. With a randomized block design and a 5 x 5 factorial scheme, with five irrigation levels - LI (25, 50, 75, 100 and 125% of ET_0), five levels of nitrogen - NN (0, 150, 300, 450 and 600 kg ha^{-1} of N) and three replications. This design was used for three cultivars of forage palm (Elephant Ear, Baiana and Miúda). At 12 and 18 months after planting (MAP), thickness, area and number of cladodes were evaluated; green mass and water productivity; and the efficient use of nitrogen extracted at 12 MAP. The LI of 125% of ET_0 had the greatest influence on the variables analyzed for the cultivars Orelha and Baiana. The maximum yield obtained for cultivar Miúda occurred through the LI of approximately 75% of ET_0 . The NN applied above 300 kg ha^{-1} provided maximum performance of the forage palm in growth and productivity. The green mass productivity of Elephant Ear (680.0 t ha^{-1}) and Baiana (647.7 t ha^{-1}) were higher in the harvest than 12 MAP; for the Miúda (254.0 t ha^{-1}) at harvest at 18 MAP. The Elephant Ear resulted in high water productivity of 93.3 kg of green mass per m^{-3} of water and extracted the largest amount of nitrogen 390.6 kg ha^{-1} . Baiana produced the largest amount of green matter due to the extracted nitrogen, with efficient use of the extracted nitrogen of 1893.7 kg of green matter per kg^{-1} of extracted nitrogen. The increased availability of water and nitrogen in the soil favored the growth and productivity of the forage palm in the semiarid region of Brazil. For this reason, it is recommended to the rural producer to cultivate the forage palm Elephant ear irrigating with 125% of ET_0 and fertilizing with 600 kg ha^{-1} of N to obtain a greater number of cladodes and green mass productivity.

KEY WORDS: *Opuntia* spp., *Nopalea* spp., fertilized water, productivity.

4.2. INTRODUÇÃO

No semiárido brasileiro, a pecuária resiste às interferências das instabilidades temporais e espaciais das chuvas, o que motiva a procura por plantas forrageiras com características ambientadas as condições climáticas desta região (RAMOS et al., 2011; PEREIRA et al., 2015). Segundo Santos et al. (2006), a palma forrageira é uma das alternativas para o semiárido, em função das suas características fisiológicas que promovem alta economia de água, favorecendo que a planta resista a longos períodos de estiagem.

O processo de adaptação dessa forrageira na região semiárida deve-se, principalmente, ao seu metabolismo fotossintético, conhecido como Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM), onde a palma forrageira abre os estômatos durante a noite para captação de CO₂ e fecham durante o dia para evitar perda de água (TAIZ et al., 2017).

Nas condições do semiárido, torna-se relevante o cultivo de xerófilas como a palma forrageira, visando à produção de forragem destinada a alimentação de animais da pecuária brasileira. Silva et al. (2010) informam que, os gêneros *Opuntia* e *Nopalea* da família cactácea, são as espécies de palma forrageira mais cultivadas no nordeste do Brasil (DANTAS et al., 2017).

No entanto, para alcançar elevado desempenho em termos de produtividade de massa verde de palma forrageira faz-se necessário a utilização da irrigação. De acordo com Pereira et al. (2015), as precipitações na região semiárida brasileira se concentram em quatro meses do ano, sendo necessário o fornecimento hídrico as culturas para que possam se desenvolver. Para confirmar a relevância da irrigação no rendimento da palma forrageira irrigada, Silva et al. (2010) expressam que, a produção da palma forrageira irrigada é cerca de duas vezes superior à de sequeiro.

Além da necessidade de irrigação, o desempenho da palma forrageira também depende da fertilidade do solo. Para Cunha et al. (2012) os solos da região semiárida, possuem baixos conteúdos de matéria orgânica e, conseqüentemente, baixa disponibilidade de nitrogênio, o que torna indispensável a aplicação de fontes externas de nitrogênio para incrementar o rendimento da palma forrageira.

Para Queiroz et al. (2015), o estudo da resposta hídrica e características morfofisiológicas da palma forrageira, contribuem para o aprimoramento do uso da água no meio agrícola. Assim, diante da resposta da cultura ao uso da irrigação e nutrientes minerais pode-se determinar a eficiência de uso da água e de nutrientes, de modo a utilizar vários indicadores, a exemplo da produtividade da água e a eficiência do uso de nutrientes (PEREIRA et al., 2012; SILVA et al., 2014; Silva et al., 2020).

Apesar da palma forrageira ter gerado bons estudos nos últimos anos, ainda são poucos os relatos dos efeitos da irrigação e fertilização nitrogenada sob o crescimento e produtividade da cultura no Seridó ocidental, semiárido do Brasil. Nesse sentido, esse estudo, objetivou avaliar o desempenho da palma forrageira sob diferentes níveis de água e nitrogênio no solo no semiárido brasileiro.

4.3. MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1. Caracterização da área de estudo

O estudo desenvolveu-se em condições de campo, entre maio de 2015 a dezembro de 2016, na fazenda Poço Redondo, município de Santa Luzia, localizado na microrregião do Seridó ocidental paraibano, latitude 06° 52' 27", longitude 36° 56' 00" WGr e altitude média de 299 m.

A região encontra-se inserida na Mesorregião da Borborema. Com clima local do tipo Bsh-Tropical, quente seco, semiárido com chuvas de verão (LIMA et al., 2020).

No Seridó ocidental, a principal característica climática não é a ausência de chuvas, mas a irregularidade delas (RODRIGUES, 2002). Nesses moldes, possui precipitação média anual de 500,0 mm, sendo a maior concentração das chuvas entre os meses de janeiro e maio. A temperatura do ar média anual de 27,6 °C, com máxima de 33,0 °C, mínima de 22,3 °C, e umidade relativa do ar oscilando entre 50 a 70% (SILVA, 2017).

O solo da área experimental possui textura franco-arenosa, classificado como do tipo Neossolo Flúvico, tendo como característica principal ser derivado de sedimentos aluviais, cujas características físicas e químicas na profundidade de 0,0 - 0,2 m encontram-se na Tabela 1, extraídas conforme metodologia da EMBRAPA (2014).

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo do experimento.

pH	MO	N	P	K	Na	Ca	Mg	Al	H	SB	CTC
	-- % --	--- mg/100g ---			----- mmol _c dm ⁻³ -----						
5,83	0,38	0,02	4,75	0,60	0,17	4,18	2,48	0,00	0,18	7,43	7,61
Granulometria							Umidade				
Areia	Silte	Argila	Porosidade	Densidade do solo	0,33 15,00		Água disponível				
----- % -----		-----		----- g cm ⁻³ -----		----- atm -----		----- % -----			
74,83	17,28	7,89	44,23	1,47	12,10	4,44	7,66				

*pH = potencial hidrogeniônico, MO = matéria orgânica, N = nitrogênio, P = fósforo, K = potássio, Na = sódio, Ca = cálcio, Mg = magnésio, Al = alumínio, H = hidrogênio, SB = soma de bases e CTC = capacidade de troca de cátions.

4.3.2. Delineamento experimental e sistema de plantio

O delineamento experimental ocorreu em blocos ao acaso e esquema fatorial 5 x 5, sendo o primeiro fator composto por cinco lâminas de irrigação - LI (25; 50; 75; 100 e 125% da ET_0); e o segundo com cinco níveis de nitrogênio - NN (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha⁻¹ de N), com três repetições, totalizando 75 unidades experimentais. Este delineamento experimental foi utilizado para três cultivares de palma forrageira - cv. (Orelha de Elefante Mexicana (Orelha) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.); IPA-Sertânia (Baiana) e Miúda, ambas *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck).

As cultivares mencionadas foram selecionadas por serem resistentes à cochonilha do carmim (*Dactylopius Opuntiae*), pois esta é atualmente a principal praga da palma forrageira no semiárido brasileiro.

A parcela experimental constituiu-se de uma fileira dupla de plantas, espaçadas de 0,4 m entre linhas; 2,0 m entre fileiras duplas; 0,25 m entre plantas; 5,0 m de comprimento e 1,0 m de bordadura. Cada parcela possuía área de 14,4 m², com área útil da parcela de 0,6 m² e densidade de plantio de 33.333 plantas por hectare. As parcelas referentes à lâmina de irrigação de 100% da ET_0 tinham área equivalente ao dobro das demais.

Todas as parcelas em sua fundação foram adubadas com fósforo e potássio seguindo as recomendações de Santos et al. (2006) e o resultado da análise de solo. A fertirrigação foi realizada mensalmente, utilizando a ureia como fonte de nitrogênio, aplicada através de um injetor de fertilizantes tipo Venturi. Recorreu-se ao esterco bovino como fertilizante orgânico, com aplicação de 1,0 kg por metro linear, com base em Santos et al. (2006).

O plantio das sementes (raquetes) aconteceu em sulco com alinhamento bilateral (tipo dominó), utilizando raquetes isentas de pragas e doenças, entre elas, a cochonilha-de-escamas (*Diaspis Echinocacti*). As raquetes passaram por um período de cura à sombra, quando o cladódio mãe perde parte da umidade, ocorrendo à cicatrização das lesões provocadas pela operação de corte no campo.

As raquetes foram plantadas nos sulcos de frente para o sol e enterradas 50% com inclinação de 45° (SUASSUNA, 1993). As aplicações dos tratamentos tiveram início dois meses após o plantio das raquetes no campo.

4.3.3. Sistema e manejo da irrigação

Com relação ao sistema de irrigação utilizou-se o gotejamento, sendo usada mangueira gotejadora com espessura da parede de 0,2 mm; diâmetro interno de 16,0 mm; espaçamento entre emissores de 0,20 m; pressão nominal de 7,0 m.c.a; vazão de 6,0 L h⁻¹ m⁻¹; e equação do

emissor $q = 0,46 \times p^{0,5}$. A água para suprir as necessidades hídricas da palma forrageira foi captada de poço amazonas localizado a 80,0 m de distância da área experimental.

A lâmina de irrigação bruta foi aplicada duas vezes por semana considerando a evapotranspiração de referência, onde a quantidade de água aplicada em cada tratamento seguiu a Equação 1.

$$LB = \left(\frac{ET_0 \cdot LAP}{Ea} \right) - PE \quad (1)$$

Em que: LB - lâmina de irrigação bruta aplicada em cada tratamento (mm); ET_0 - evapotranspiração de referência (mm); LAP - fração da lâmina a ser aplicada em cada tratamento (decimal); Ea - eficiência de aplicação do sistema de irrigação (0,96) e PE - precipitação efetiva (mm).

A precipitação pluviométrica foi monitorada com auxílio de um pluviômetro instalado próximo a área experimental, posteriormente, utilizou-se a metodologia do Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS USDA) para determinar a precipitação efetiva.

A intensidade de aplicação do sistema de irrigação seguiu a metodologia proposta por Mantovani et al. (2012), conforme expõe a Equação 2.

$$Ia = \frac{Ne \cdot q}{A} \quad (2)$$

Em que: Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}); Ne - número de emissores por planta; q - vazão média dos emissores ($1,21 \text{ L h}^{-1}$); e A - área ocupada pela planta ($0,30 \text{ m}^2$).

Com base em Mantovani et al. (2012) através da Equação 3, foi determinado o tempo de irrigação necessário para aplicar a lâmina de irrigação em cada tratamento.

$$Ti = \frac{LB}{Ia} \quad (3)$$

Em que: Ti - tempo de aplicação da irrigação (h); LB - lâmina de irrigação bruta (mm); e Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}).

A lâmina de irrigação foi quantificada através de um hidrômetro instalado junto ao sistema de irrigação, possibilitando conhecer o volume de água aplicado por tratamento.

4.3.4. Estimativa da evapotranspiração de referência

Calculou-se a evapotranspiração de referência diária (ET_0) pela metodologia de Penman-Monteith, recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998), conforme a Equação 4. Os dados meteorológicos foram obtidos a partir de uma estação meteorológica automática instalada próxima a área experimental.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

Em que: ET_0 - evapotranspiração de referência diária (mm dia^{-1}); R_n - saldo diário da radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); G - fluxo diário de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$); T - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 - velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s - pressão de saturação do vapor d'água média (kPa); e_a - pressão de vapor média (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

4.3.5. Características analisadas

4.3.5.1. Variáveis de crescimento

Na análise de crescimento da palma forrageira, foram avaliados aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP), a espessura de cladódios (EC) que foram determinados com auxílio de paquímetro digital em mm; a área de cladódios (AC), estimada na Equação 5; e o número de cladódios por planta (NC), através da contagem de todos os cladódios da planta.

$$AC = CC . LC . FC \quad (5)$$

Em que: AC - área de cladódios (cm^2); CC - comprimento de cladódios (cm); LC - largura de cladódios (cm); e FC - fator de correção em função do formato do cladódio - Orelha = 0,70; Baiana e Miúda = 0,75 (LIMA et al., 2020).

4.3.5.2. Variáveis de produção

A produtividade de massa verde (PMV) da palma forrageira foi determinada em campo aos 12 e 18 (MAP). O corte das plantas realizado na primeira inserção, deixando apenas o cladódio mãe. Em seguida, procedeu-se a pesagem da massa verde em balança de precisão, de todos os cladódios, separados por parcela e tratamento.

A produtividade da água (PA) foi estimada aos 12 e 18 MAP, através da relação entre a produtividade de massa verde da palma forrageira com a quantidade de água aplicada em cada

parcela experimental, para conseguir avaliar a capacidade da cultura converter o volume de água em massa verde, de acordo com a Equação 6 (GUAN et al., 2015).

$$PA = \frac{PMV}{VA} \quad (6)$$

Em que: PA - produtividade da água (kg m^{-3}); PMV - produtividade de massa verde da palma forrageira (kg ha^{-1}); e VA - volume de água da precipitação efetiva mais irrigação aplicada ao longo do ciclo de cultivo ($\text{m}^3 \text{ha}^{-1}$).

Aos 12 MAP determinou-se a eficiência de uso do nitrogênio extraído (EUNE) por meio da razão entre a produtividade de massa verde da palma forrageira com o teor de nitrogênio extraído em cada tratamento (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha^{-1} de N), seguindo a Equação 7 (MOLL et al., 1982).

$$EUNE = \frac{PMV}{TNE} \quad (7)$$

Em que: EUNE - eficiência de uso do nitrogênio extraído (kg kg^{-1}); PMV - produtividade de massa verde da palma forrageira (kg ha^{-1}); e TNE - teor de nitrogênio extraído dos cladódios em cada tratamento (kg kg^{-1}).

O resultado da EUNE permite analisar a capacidade de a palma forrageira converter o nitrogênio extraído em massa verde. No cálculo da EUNE foram utilizados os valores do teor de nitrogênio extraído de Borges (2018) e, ainda, a quantidade de massa seca das cultivares Orelha (8,40%), Baiana (6,56%) e Miúda (11,55) de Ferraz (2018), esses trabalhos foram oriundos do mesmo experimento.

A extração de nitrogênio no tecido dos cladódios da planta foi determinada aos 12 MAP através de amostra composta de cada tratamento. Após a colheita, as amostras foram secas em estufa a 60 °C e, posteriormente, no laboratório de solos e nutrição mineral de plantas da Universidade Federal da Paraíba no município de Areia - PB, estabeleceu-se os teores de nitrogênio em kg kg^{-1} , através da metodologia de Malavolta et al. (1989), sendo o nitrogênio obtido por digestão sulfúrica com o método Kjeldahl.

4.3.6. Análise estatística

Os resultados encontrados foram submetidos à análise de variância pelo teste F em nível de 1 e 5% de probabilidade. As variáveis significativas passaram por análise de regressão

linear e polinomial para os fatores quantitativos lâminas de irrigação (LI) e níveis de nitrogênio (NN).

A preferência na escolha dos modelos de regressão para cada variável foi baseada na significância dos parâmetros de regressão. A análise estatística aplicada de forma individual para cada cultivar (cv.) de palma forrageira. Os procedimentos foram realizados com auxílio do programa Sisvar (FERREIRA, 2014).

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1. Consumo de água

Encontra-se na Tabela 2 a quantidade de água aplicada no cultivo da palma forrageira através das lâminas de irrigação (LI) mais a precipitação efetiva (PE) aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

Tabela 2. Quantidade de água aplicada no cultivo da palma forrageira através das lâminas de irrigação mais precipitação efetiva aos 12 e 18 MAP.

LI (% da ET ₀)	LI (mm)	PE (mm)	LI + PE	LI (mm)	PE (mm)	LI + PE
	12 MAP			18 MAP		
25	74,2	407,7	481,9	101,6	573,6	675,2
50	148,4	407,7	556,1	203,2	573,6	776,8
75	222,7	407,7	630,4	304,9	573,6	878,5
100	296,9	407,7	704,6	406,5	573,6	980,1
125	371,1	407,7	778,8	508,1	573,6	1081,7

Legenda: LI - lâmina de irrigação; PE - precipitação efetiva; LI + PE - total da lâmina de irrigação mais precipitação efetiva e MAP - meses após o plantio.

Estudando a morfogênese da palma forrageira irrigada Pereira et al. (2015), relatam que a cultura recebeu 188 mm por meio da irrigação, mais 159 mm da lâmina de uniformização e, ainda, 211 mm da precipitação, totalizando 558 mm em um ano de cultivo. Estes valores estão de acordo com os observados no presente estudo aos 12 MAP.

Queiroz et al. (2015) pesquisando a palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação, relatam que as lâminas aplicadas totalizaram 976, 1048, 1096, 1152 e 1421 mm em 380 dias de ciclo. Essa quantidade de água está muito acima dos valores encontrados nessa pesquisa aos 365 dias após o plantio, pois o volume de água utilizado pelos autores seria suficiente para irrigar o atual estudo até os 18 MAP.

4.4.2. Espessura de cladódios

Na Tabela 3 observa-se o resumo da análise de variância para a variável estudada espessura de cladódios das cultivares de palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 MAP.

Tabela 3. Resumo da análise de variância para a variável espessura de cladódios (EC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

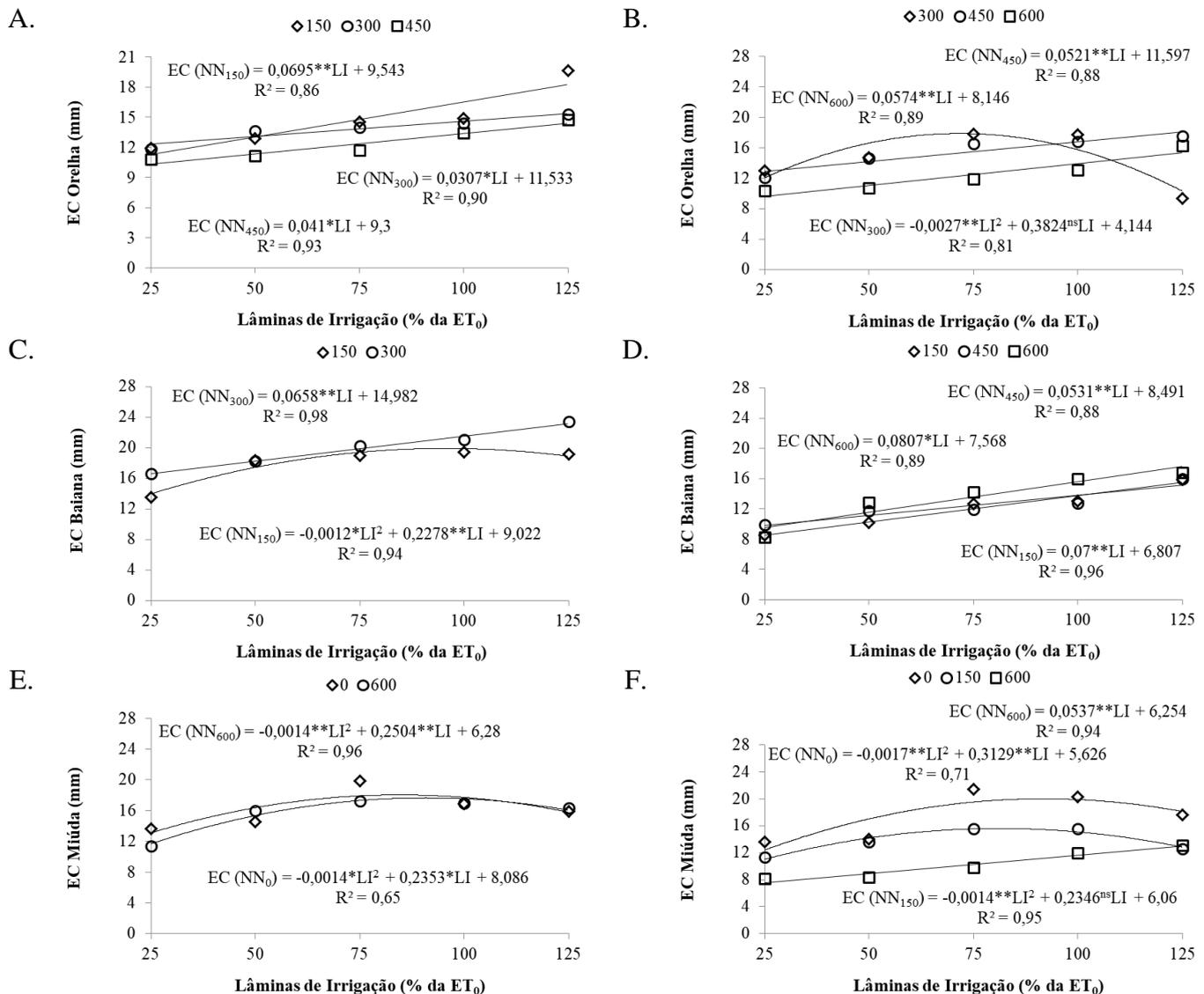
Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----					
		EC (mm) 12 MAP			EC (mm) 18 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda	Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	8,44**	40,22**	11,47**	19,34**	36,55**	37,33**
Linear	1	0,18ns	64,94**	9,37ns	54,96**	98,74**	112,32**
Quadrática	1	2,98ns	12,83ns	8,84ns	17,49*	0,92ns	21,76*
Nível de Nitrogênio (NN)	4	11,03**	18,88**	31,88**	82,65**	180,89**	153,17**
Linear	1	12,27**	5,64ns	19,01**	258,20**	112,15**	416,00**
Quadrática	1	2,16ns	0,33ns	36,71**	7,02ns	518,26**	138,28**
LI x NN	16	9,57**	9,19**	9,28**	16,40**	12,00**	11,61**
Bloco	2	0,36	0,60	0,18	1,22	6,49	3,23
Erro	48	1,62	3,44	2,51	4,46	4,54	4,14
C.V. (%)	-	9,41	10,06	9,60	13,71	16,44	16,38
Média Geral	-	13,52	18,44	16,51	15,41	12,96	12,43

^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

As fontes de variação LI e NN influenciaram significativamente a espessura dos cladódios (EC) das cultivares Orelha, Baiana e Miúda aos 12 e 18 MAP. Queiroz et al. (2015), em seu estudo, dizem que o acréscimo da disponibilidade hídrica para a palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana não influenciou de forma expressiva as variáveis de crescimento. O que difere desse estudo, isso por sua vez, pode ser justificado pelas condições edafoclimáticas em que se desenvolveu a pesquisa.

Dados significativos da interação entre os fatores LI e NN foram identificados para a variável analisada EC ao nível de 0,01 de probabilidade pelo teste F. Cunha et al. (2012) estudando a palma forrageira Miúda sob doses de nitrogênio, ressaltaram que houve efeito linear negativo a $P < 0,05$ da fertilização sobre a espessura de cladódios. Estes resultados divergem dos encontrados no presente estudo, possivelmente em decorrência das doses de nitrogênio ter sido diferentes das utilizadas neste estudo.

Na Figura 1 estão o desdobramento da interação para os fatores estudados lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio referente à espessura de cladódios da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda aos 12 e 18 MAP.



cv./NN	ns Médias da EC (mm) aos 12 meses					ns Médias da EC (mm) aos 18 meses					
	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600	
Orelha	13,5	-	-	-	13,2	Orelha	18,9	15,7	-	-	-
Baiana	17,9	-	-	17,2	19,3	Baiana	18,2	-	8,5	-	-
Miúda	-	17,3	18,6	14,9	-	Miúda	-	-	9,5	11,3	-

Figura 1. Espessura de cladódios (EC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas P<0,05 pelo Teste F.

O desdobramento dos NN dentro das LI para a cultivar Orelha evidencia que, a interação 150 kg ha⁻¹ de N mais LI de 125% da ET₀ proporcionaram a maior EC (18,2 mm) aos 12 MAP (Figura 1A), enquanto que, aos 18 MAP a maior EC (18,1 mm) foi obtida da

combinação de 450 kg ha⁻¹ de N com LI de 125% da ET₀ (Figura 1B). Comportamento semelhante foi observado para a cv. Baiana, demonstrando que o incremento na LI contribuiu para a máxima EC, onde aos 12 MAP a maior EC (23,2 mm) foi alcançada a partir da interação 300 kg ha⁻¹ com 125% da ET₀ (Figura 1C), ao passo que, aos 18 MAP a combinação entre 600 kg ha⁻¹ com 125% da ET₀ resultou na máxima EC (17,6 mm) (Figura 1D).

O acréscimo na LI proporcionou maior EC (18,0 mm) da cv. Miúda ao aplicar 84,0% da ET₀ com 0 kg ha⁻¹ de N aos 12 MAP (Figura 1E). Aos 18 MAP a maior EC (20,0 mm) ocorreu com a irrigação a 92,0% da ET₀ com 0 kg ha⁻¹ de N (Figura 1F). A LI de 125% da ET₀ propiciou a maior EC para as cultivares Orelha e Baiana, já para a Miúda as LI que maximizaram a EC foram menores que 100% da ET₀. O NN de 0 kg ha⁻¹ contribuiu para maior EC apenas para a cv. Miúda.

Silva et al. (2014) constataram menor espessura de cladódios na cv. Miúda do gênero *Nopalea* sp., os autores ainda relatam que esta é uma das características dessa palma, pois possui menores cladódios quando comparado ao gênero *Opuntia* sp. Na pesquisa em questão, a maior EC (23,2 mm) foi alcançada na cultivar Baiana do gênero *Nopalea* sp.

Silva et al. (2011), analisando as características morfológicas da palma forrageira cv. Gigante do gênero *Opuntia* sp., cultivada de forma adensada e fertilizada com nitrogênio, verificaram maior espessura de cladódios na dose de 0 e 70 kg ha⁻¹ de nitrogênio, corroborando com o presente estudo, uma vez que, para a cultivar Miúda a maior EC aconteceu com a aplicação de 0 kg ha⁻¹ de N.

Santos et al. (2017) estudando o desenvolvimento da palma forrageira em função de lâminas de irrigação, obtiveram maior espessura de cladódios na reposição de 115% da ETc. Na presente pesquisa, a lâmina de irrigação de 125% da ET₀ acarretou nas maiores EC para as cultivares Orelha e Baiana. Isto confirma que, o aumento do volume de água aplicado incrementa a espessura de cladódios da palma forrageira.

A espessura de cladódios é uma das características que se correlaciona diretamente com a turgidez dos cladódios da palma forrageira, sendo assim, quanto mais turgidos maior a quantidade de água presente nas células, sendo esta uma das características das plantas CAM, expressando anatomicamente através da maior espessura de cladódios em função da máxima quantidade de água armazenada (NOBEL, 2001; TAIZ & ZEIGER, 2013).

4.4.3. Área de cladódios

A área de cladódios da palma forrageira Orelha foi influenciada apenas pela fonte de variação NN aos 18 MAP, enquanto que, a Baiana e Miúda sofreram interferências tanto da LI quanto de NN aos 12 e 18 MAP, respectivamente. Para a Baiana, houve interação das fontes de variação LI com NN aos 12 e 18 MAP, enquanto que, ocorreu interação para a AC da Miúda aos 12 MAP e de forma isolada para cada FV aos 18 MAP (Tabela 4).

Tabela 4. Resumo da análise de variância para a variável área de cladódios (AC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

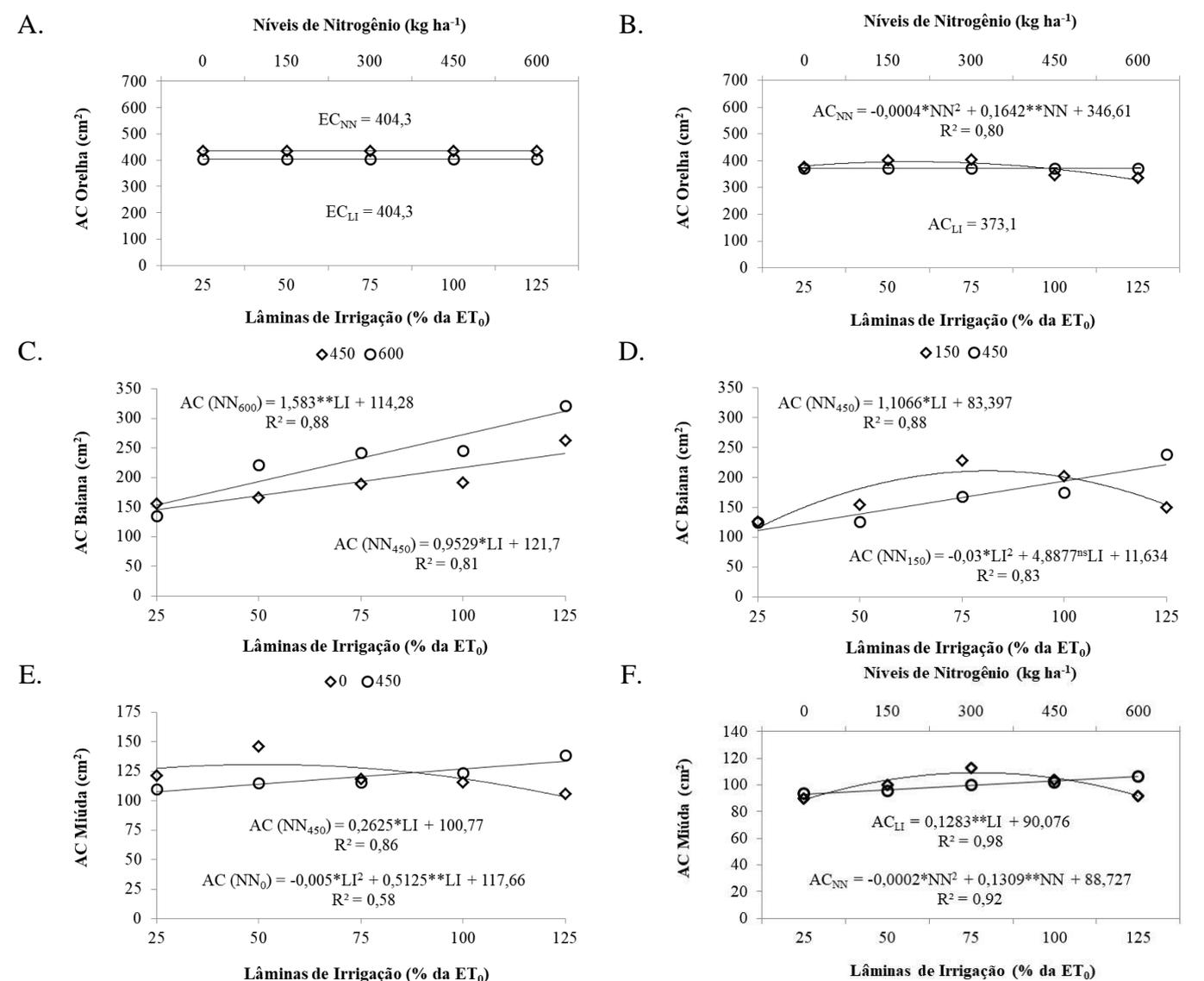
Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----					
		AC (cm ²) 12 MAP			AC (cm ²) 18 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda	Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	4123,14ns	6275,55*	122,34ns	2332,28ns	3144,95ns	394,62*
Linear	1	8,98ns	5194,39ns	25,54ns	8461,52ns	2248,08ns	1116,84**
Quadrática	1	5123,77ns	14678,49**	0,001ns	46,11ns	347,40ns	58,35ns
Nível de Nitrogênio (NN)	4	7050,91ns	10293,57**	290,94ns	14158,13**	977,20ns	1299,29**
Linear	1	5155,63ns	4927,23ns	191,54ns	22221,20**	89,40ns	4059,12**
Quadrática	1	16673,28ns	58,14ns	104,16ns	10462,92*	991,04ns	142,68ns
LI x NN	16	2801,68ns	6633,75**	345,74**	2139,37ns	3895,80**	286,25ns
Bloco	2	738,83	699,85	28,73	1502,81	508,39	329,30
Erro	48	3846,61	2021,18	147,65	1826,20	1668,41	147,71
C.V. (%)	-	15,34	21,59	10,45	11,45	24,70	12,19
Média Geral	-	404,29	208,21	116,28	373,09	165,39	99,70

^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

Estudando as mesmas cultivares de palma forrageira Pereira et al. (2015), constataram que as diferentes condições de disponibilidade de água não ocasionaram efeitos a $P > 0,05$ para a maioria das variáveis biométricas analisadas. Estes resultados diferem do presente estudo, uma vez que, as LI influenciaram positivamente a EC e AC da palma forrageira.

Cunha et al. (2012) não observaram efeito das doses de 0, 100, 200 e 300 kg ha⁻¹ de nitrogênio sobre os valores médios da área de cladódios da palma forrageira. Este resultado não concorda com a atual pesquisa, visto que os NN interferiram na espessura e área de cladódios das três cultivares de palma forrageira estudadas.

Os desdobramentos das interações significativas entre as fontes de variação (LI e NN) para a cultivar Baiana aos 12 e 18 MAP e Miúda aos 12 MAP encontram-se na Figura 2.



cv./NN	ns Médias da AC (cm ²) aos 12 meses					cv./NN	ns Médias da AC (cm ²) aos 18 meses				
	0	150	300	450	600		0	150	300	450	600
Orelha	367,8	423,4	415,3	412,0	402,8	Orelha	376,0	401,2	404,3	336,3	347,6
Baiana	181,2	239,5	194,2	-	-	Baiana	164,9	-	152,1	-	171,6
Miúda	-	114,6	112,0	-	112,9	Miúda	112,8	100,1	103,9	89,9	91,9

Figura 2. Área de cladódios (AC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas P<0,05 pelo Teste F.

A área de cladódios da palma forrageira orelha aos 12 MAP não foi significativa a $p>0,05$, sendo a média de 404,3 cm² para os fatores isolados LI e NN (Figura 2A), sendo que, aos 18 MAP o comportamento foi semelhante para as LI, com média de 373,1 cm². A fonte de variação NN aos 18 MAP teve comportamento quadrático, com maior AC (363,5 cm²) na dose de 205,3 kg ha⁻¹ de N (Figura 2B).

O aumento da LI contribuiu para o maior desenvolvimento da AC da palma Baiana, onde a interação entre LI de 125% da ET_0 com 600 kg ha^{-1} de N proporcionou a máxima AC ($312,2 \text{ cm}^2$) aos 12 MAP (Figura 2C). O desdobramento das fontes de variação aos 18 MAP mostra que a maior AC ($221,7 \text{ cm}^2$) foi evidenciada em LI de 125% da ET_0 com 450 kg ha^{-1} de N (Figura 2D).

A interação entre LI de 125% da ET_0 com 450 kg ha^{-1} de N influenciou positivamente o desenvolvimento da AC da cultivar miúda, com média de $133,6 \text{ cm}^2$ aos 12 MAP (Figura 2E). As fontes de variação tiveram efeitos isolados sobre a AC da Miúda aos 18 MAP, observando-se que para a LI de 125% da ET_0 a média foi de $106,1 \text{ cm}^2$ e para os NN a maior AC ($110,1 \text{ cm}^2$) foi obtida com $327,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de N (Figura 2F).

Rocha et al. (2017) observaram que a palma forrageira Miúda possui menor tamanho dos cladódios quando comparada a outros genótipos, esta cultivar aumenta o número de cladódios para compensar o tamanho dos mesmos. Estes resultados corroboram com o presente estudo, uma vez que, a menor AC foi observada na cultivar Miúda.

Assim, como ocorreu para a EC, na AC a LI de 125% da ET_0 foi a que maximizou a variável analisada. Queiroz et al. (2015) relatam que as características morfofisiológicas da palma forrageira não sofreram alteração significativas das lâminas de água aplicada. Este fato pode estar relacionado às condições em que a pesquisa foi conduzida, pois no estudo aqui apresentado as LI promoveram incremento da AC.

A aplicação de NN superior a 200 kg ha^{-1} elevou ao máximo a AC das cultivares estudadas. De acordo com Taiz & Zaiger (2016), a aplicação de nitrogênio nas culturas é essencial, já que, este nutriente é escasso na maioria dos solos da região semiárida. Dado este problema, é indispensável à aplicação de fontes de N para o cultivo da palma forrageira.

A área de cladódios depende do clone, que possui diferentes morfologias de emissão, tamanho, formato e distribuição dos cladódios das plantas, sendo que estas características podem influenciar a capacidade de fotossíntese e a produtividade da palma forrageira (SILVA et al., 2010).

4.4.4. Número de cladódios

A interação entre LI com NN influenciaram positivamente o número de cladódios por planta das cultivares de palma forrageira Orelha e Baiana aos 12 e 18 MAP. O NC da cultivar Miúda aos 12 MAP foi influenciado apenas pelos NN, ao passo que, aos 18 MAP ocorreu efeito isolado das LI e dos NN (Tabela 5).

Tabela 5. Resumo da análise de variância para a variável número de cladódios por planta (NC) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

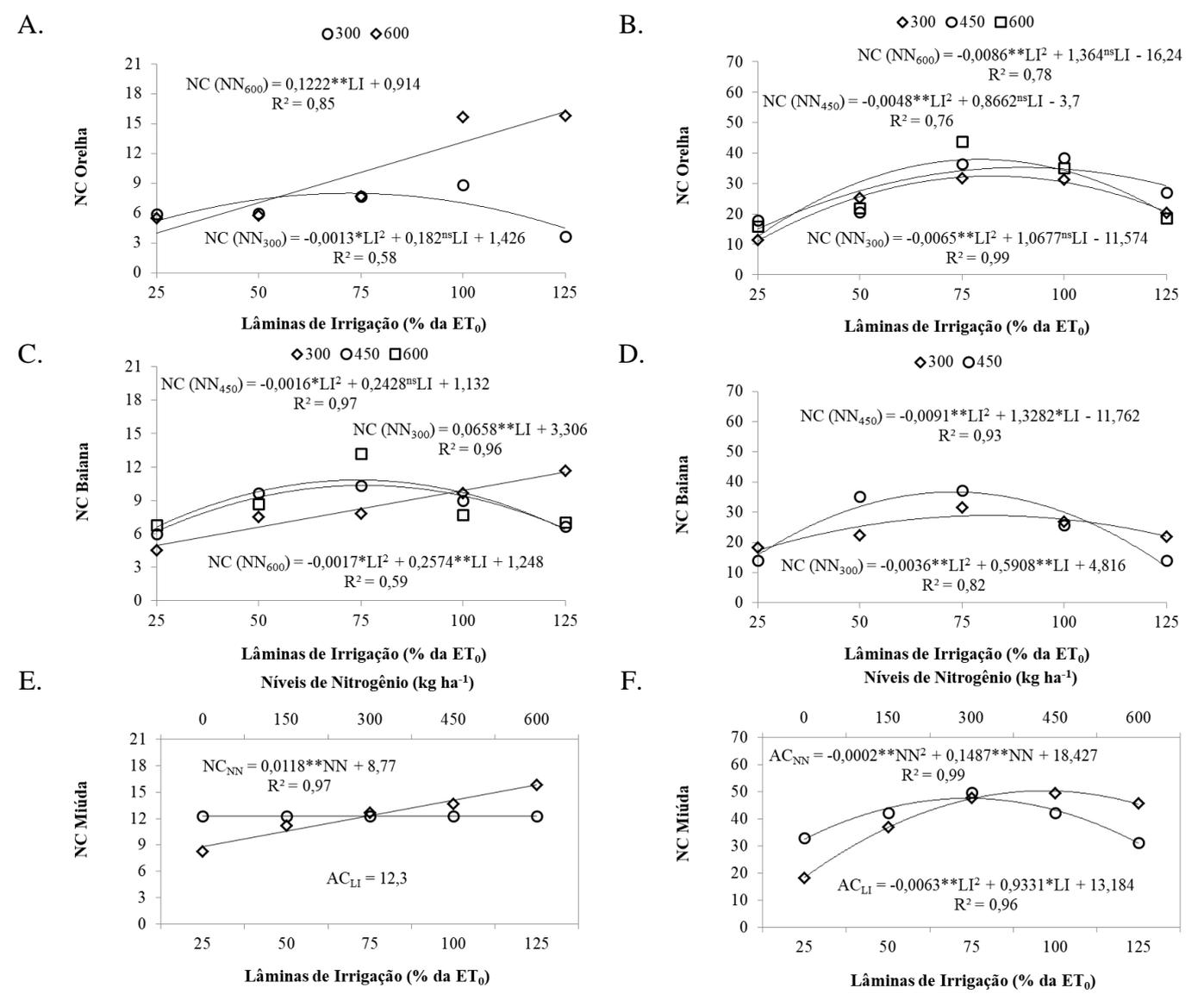
Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----					
		NC 12 MAP			NC 18 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda	Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	22,97**	14,70**	3,91ns	372,05**	580,61**	860,58**
Linear	1	40,66**	10,35ns	5,529ns	420,01**	611,25**	2072,78**
Quadrática	1	5,34ns	3,57ns	2,88ns	408,80**	430,86*	140,22ns
Nível de Nitrogênio (NN)	4	50,83**	36,19**	122,01**	572,62**	828,60**	2505,58**
Linear	1	170,03**	121,68**	420,68**	2042,41**	1652,03**	4817,80**
Quadrática	1	28,01*	5,93ns	9,39ns	182,00ns	1223,08**	2042,35**
LI x NN	16	20,44**	12,08**	21,86ns	198,60**	307,69**	322,45ns
Bloco	2	7,70	7,49	41,73	55,76	213,68	46,39
Erro	48	4,36	4,24	13,37	63,17	90,84	184,07
C.V. (%)	-	29,73	28,28	29,67	35,88	41,09	34,17
Média Geral	-	7,03	7,28	12,32	22,15	23,19	39,70

^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

Queiroz et al. (2015), estudando a palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação, constataram que, o incremento na lâmina de irrigação influenciou de maneira positiva o número de cladódios, uma vez que, os valores observados foram superiores aos relatados em cultivos de sequeiro. Informações que confirmam os dados dessa pesquisa. Verifica-se que, o uso da irrigação é relevante para aumentar o NC da palma forrageira. Os autores Pinheiro et al. (2014) relatam que o número total de cladódios proporcionou alto efeito indireto no rendimento da palma forrageira, destacando assim, a importância do aumento do NC da palma forrageira.

No cultivo de palma forrageira, o nitrogênio é o nutriente com maior influência no crescimento das plantas, por proporcionar alterações na morfologia das plantas e, em condições de elevado fornecimento ocorre maior desenvolvimento (SILVA et al., 2012; DONATO et al., 2014; BARROS et al., 2016). O que também está presente nesse estudo, em virtude de, os NN terem influenciados o NC da palma forrageira.

Na Figura 3 observa-se os desdobramentos das interações significativas entre as fontes de variação lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio para as cultivares Orelha e Baiana aos 12 e 18 MAP, e médias das fontes de variação isoladas da cv. Miúda aos 12 e 18 MAP.



cv./NN	^{ns} Médias do NC aos 12 meses					^{ns} Médias do NC aos 18 meses					
	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600	
Orelha	5,5	5,9	-	7,3	-	Orelha	13,6	18,1	-	-	-
Baiana	5,4	5,7	-	-	-	Baiana	11,7	21,1	-	-	26,2
Miúda	8,2	11,2	13,7	12,7	15,9	Miúda	18,2	47,9	37,1	49,5	45,7

Figura 3. Número de cladódios por planta (NC) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas P<0,05 pelo Teste F.

A interação entre as fontes de variação LI (125% da ET₀) com NN (600 kg ha⁻¹) proporcionou o maior número de cladódios (16,2) para a cultivar Orelha aos 12 MAP, enquanto que, aos 18 MAP a combinação entre 79,3% da ET₀ com 600 kg ha⁻¹ de N resultou no máximo NC (37,8) (Figura 3A e B). Desempenho semelhante ocorreu na cv. Baiana, onde, aos 12 MAP a interação 125% da ET₀ com 300 kg ha⁻¹ de N proporcionou 11,5 cladódios por

planta, logo, aos 18 MAP a combinação 73,0% da ET_0 junto a 450 kg ha^{-1} de N resultou em 36,7 cladódios por planta (Figura 3C e D).

O aumento dos níveis de nitrogênio contribuiu para o acréscimo do NC da cultivar Miúda, com maior média de 15,8 cladódios por planta, com aplicação de 600 kg ha^{-1} de N aos 12 MAP. O fator isolado LI de 74,1% da ET_0 provocou o maior NC (47,7) aos 18 MAP, ao passo que, o NN de $371,8 \text{ kg ha}^{-1}$ de N resultou em 46,1 cladódios por planta (Figura 3E e F). Observa-se ainda que aos 18 MAP o NC foi influenciado por uma menor LI de 75,5% da ET_0 , enquanto que, a aplicação de NN acima de 300 kg ha^{-1} de N foram os que mais interferiram na quantidade de cladódios por planta.

O número de cladódios por planta é uma variável muito importante para os produtores de palma forrageira. Santos et al. (2006); Leite (2009); e Cruz Neto et al. (2017) defendem que, a produção de cladódios pode ser destinada a venda como semente, desta forma, possibilitando a ampliação das áreas cultivadas.

Flores-Hernández et al. (2004), em relação ao rendimento e características fisiológicas de *Opuntia* spp. apontam que a irrigação adicional não resultou em diferença significativa na produção de cladódios verdes, diferente dos resultados encontrados nesse estudo, visto que, as lâminas de irrigação incrementaram o NC da palma forrageira.

Cunha et al. (2012), verificaram que a aplicação de doses de nitrogênio contribuiu para o aumento do número de cladódios da cv. Miúda, onde na dose de 300 kg ha^{-1} de N, tem se a maior média com 36,0 cladódios por planta. Estes resultados corroboram com esta pesquisa, uma vez que, os NN incrementaram o NC por planta.

4.4.5. Produtividade de massa verde

A produtividade de massa verde da palma forrageira Orelha foi influenciada de maneira expressiva pelo efeito da interação entre LI com NN aos 12 e 18 MAP. Para a cultivar Baiana, ocorreu interação aos 12 MAP, e aos 18 MAP houve efeito isolado das fontes de variação, para a cv. Miúda o efeito isolado dos NN aos 12 MAP, e interação entre as fontes de variação aos 18 MAP (Tabela 6).

Tabela 6. Resumo da análise de variância para a variável produtividade de massa verde (PMV) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

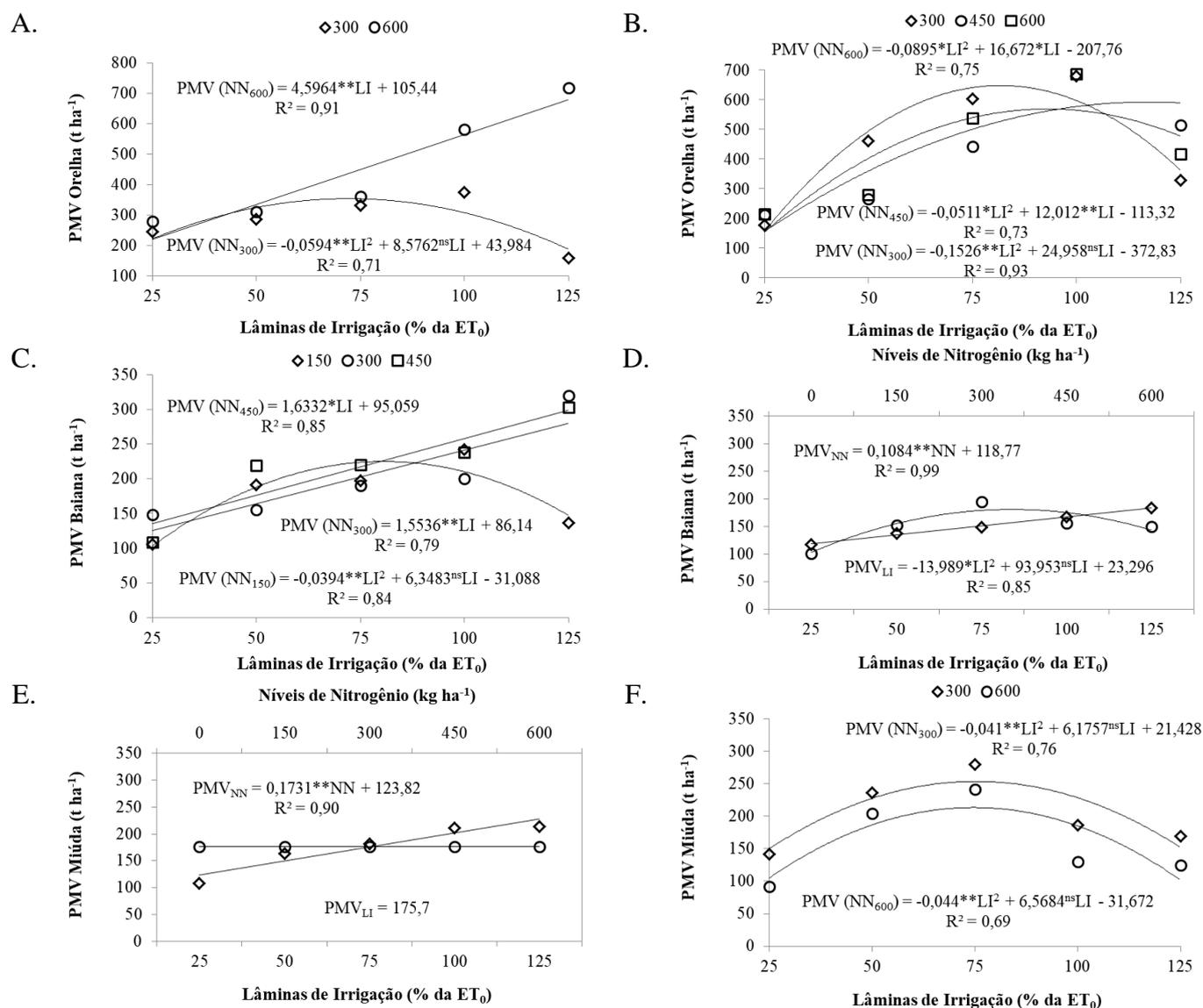
Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----					
		PMV (t ha ⁻¹) 12 MAP			PMV (t ha ⁻¹) 18 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda	Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	32257,85**	5459,17ns	5534,61ns	198293,10**	16588,97**	5414,52ns
Linear	1	68891,02**	2357,79ns	6140,16ns	436482,48**	4485,95*	2,16ns
Quadrática	1	22676,17ns	6316,25ns	48,29ns	98518,34	625,05ns	2239,63ns
Nível de Nitrogênio(NN)	4	152016,46**	23096,37**	28083,54**	82909,17*	9944,36*	19394,00**
Linear	1	474924,43**	77557,04**	56256,29**	219910,96**	34017,51**	3920,90ns
Quadrática	1	18931,60**	14757,18*	16384,06*	104154,56*	159,99ns	60911,20ns
LI x NN	16	27970,61**	11831,94**	3466,03ns	74590,22**	5809,98ns	6069,83**
Bloco	2	19261,26	3352,33	622,71	22536,85	15620,98	11434,22
Erro	48	6027,85	2656,40	3264,31	26531,51	3650,65	2419,62
C.V. (%)	-	26,77	27,55	32,51	41,73	39,94	28,16
Média Geral	-	289,99	187,07	175,74	390,33	151,28	174,68

^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

A quantidade de água disponível no solo influencia diretamente a produção de massa da palma forrageira (RAMOS et al., 2011), bem como aconteceu nessa pesquisa, já que as lâminas de irrigação aplicadas influenciaram a produtividade de massa verde das cultivares estudada, assim, destaca-se a importância da irrigação aplicada de forma racional para aumentar a produtividade da palma forrageira na região semiárida.

Em relação a nitrogênio pode-se dizer que se trata de um nutriente que estimula a divisão celular e promove o desenvolvimento das plantas, portanto, torna-se indispensável à aplicação de fontes externas de nitrogênio para o acréscimo da produção da palma forrageira (CUNHA et al., 2012). O que acaba explicando o efeito dos NN sobre a produtividade de massa verde do presente estudo.

Os desdobramentos das interações significativas entre as fontes de variação lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio para a cultivar Orelha aos 12 e 18 MAP, Baiana aos 12 MAP e Miúda aos 18 MAP, e médias das fontes de variação isoladas da cv. Baiana aos 18 MAP e da Miúda aos 12 MAP encontram-se na Figura 4.



	^{ns} Médias da PMV (t ha ⁻¹) aos 12 meses					^{ns} Médias da PMV (t ha ⁻¹) aos 18 meses					
cv./NN	0	150	300	450	600	cv./NN	0	150	300	450	600
Orelha	170,3	273,9	276,9	-	-	Orelha	269,4	368,8	-	-	-
Baiana	124,1	-	-	-	216,2	Baiana	118,1	149,2	137,2	168,1	183,9
Miúda	108,1	181,7	211,3	163,5	214,0	Miúda	124,3	208,3	-	183,3	-

Figura 4. Produtividade de massa verde (PMV) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas a $P < 0,05$ pelo Teste F.

A palma forrageira Orelha cultivada com reposição de 125% da ET_0 e fertilizada com 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio, apresentou uma produtividade de massa verde de 680,0 t ha⁻¹ aos 12 MAP, logo, aos 18 MAP a associação entre LI de 81,8% da ET_0 com 300 kg ha⁻¹ de N proporcionou a maior PMV de 647,7 t ha⁻¹ (Figura 4A e B).

A interação entre LI de 125% da ET_0 com 450 kg ha^{-1} de N resultou na maior PMV (299,2 t ha^{-1}) da cv. Baiana aos 12 MAP, ao passo que, o fator isolado LI de 125% da ET_0 teve 181,0 t ha^{-1} e o NN de 600 kg ha^{-1} de N com 183,8 t ha^{-1} de massa verde aos 18 MAP (Figura 4C e D).

A fonte de variação NN aos 12 MAP resultou em 227,7 t ha^{-1} de massa verde quando se aplicou 600 kg ha^{-1} de N, já nos 18 MAP a interação entre LI de 75,3% da ET_0 com 300 kg ha^{-1} de N produziu cerca de 254,0 t ha^{-1} de massa verde da cv. Miúda (Figura 4E e F). Observa-se que a LI de 125% da ET_0 maximizou a PMV das cultivares Orelha e Baiana, comportamento semelhante ao observado para o número de cladódios. Assim, como ocorreu para o NC, a aplicação de níveis de nitrogênio acima de 300 kg ha^{-1} favoreceu o incremento da produtividade de massa verde da palma forrageira.

De acordo com Merwer et al. (1997), o aumento da disponibilidade de água influencia no crescimento e produtividade da palma forrageira, no entanto, isso só ocorre quando a cultura é irrigada com reposição superior a 60% da evaporação (FLORES-HERNÁNDEZ et al., 2004; SILVA et al., 2015). Os resultados destes autores reafirmam os obtidos no presente estudo, visto que, as lâminas de irrigação acima de 70% da ET_0 determinaram positivamente o rendimento da palma forrageira.

Queiroz et al. (2015), alcançou 146,3 t ha^{-1} de matéria verde da palma forrageira quando aplicou uma lâmina de irrigação mais precipitação de 1048 mm. Verifica-se que, mesmo com a maior lâmina de irrigação aplicada, a produtividade obtida por estes autores é inferior as desse estudo. O que pode estar relacionado com as condições edafoclimáticas em que os experimentos foram conduzidos.

Cunha et al. (2012), também constataram aumento da produtividade da palma forrageira cultivada sob adubação nitrogenada, sendo que, a aplicação de 300 kg ha^{-1} de nitrogênio teve 197,0 t ha^{-1} de biomassa verde em plantas colhidas aos 18 meses. Observa-se que, a dose de nitrogênio destes autores está de acordo com os níveis de nitrogênio do presente estudo, apesar, da produtividade ainda ser muito inferior.

O nitrogênio aumenta a divisão celular e a fotossíntese em função da maior quantidade de reações fotoquímicas e da assimilação de CO_2 e, conseqüentemente, promove o crescimento foliar das plantas (LAWLOR, 2002). Os níveis de nitrogênio do presente estudo podem ter ajudado o crescimento e o número de cladódios, desta forma, resultando em maior produtividade de massa verde da palma forrageira.

4.4.6. Produtividade da água

A interação entre LI com NN afetou significativamente a produtividade da água da cultivar de palma forrageira Orelha aos 12 e 18 MAP, da cv. Baiana aos 12 MAP e da Miúda aos 18 MAP. A cultivar Miúda aos 12 MAP e a Baiana aos 18 MAP foram influenciadas pelas fontes de variação de forma isoladas (Tabela 7).

Tabela 7. Resumo da análise de variância para a variável produtividade da água (PA) da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 e 18 meses após o plantio (MAP).

Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----					
		PA (kg m ⁻³) 12 MAP			PA (kg m ⁻³) 18 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda	Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	698,64**	571,17**	874,06**	1020,19*	310,40**	322,45**
Linear	1	114,58ns	1592,83**	3020,42**	302,74ns	303,60*	933,00**
Quadrática	1	2228,54**	558,93*	31,78ns	1190,00ns	1,83ns	118,72ns
Nível de Nitrogênio (NN)	4	2454,94**	521,17**	775,44**	1051,00*	157,25*	279,30**
Linear	1	6911,54**	1693,44**	1523,23**	2625,04**	575,46**	66,93ns
Quadrática	1	987,57*	370,14ns	482,75*	1382,92*	5,18ns	869,05**
LI x NN	16	701,12**	352,50**	103,80ns	1066,47**	84,18ns	94,12**
Bloco	2	489,33	42,29	37,99	238,97	191,38	172,64
Erro	48	198,34	96,63	85,47	336,86	48,63	32,10
C.V. (%)	-	29,26	32,60	31,95	41,61	39,73	27,69
Média Geral	-	48,14	30,15	28,93	44,11	17,55	20,46

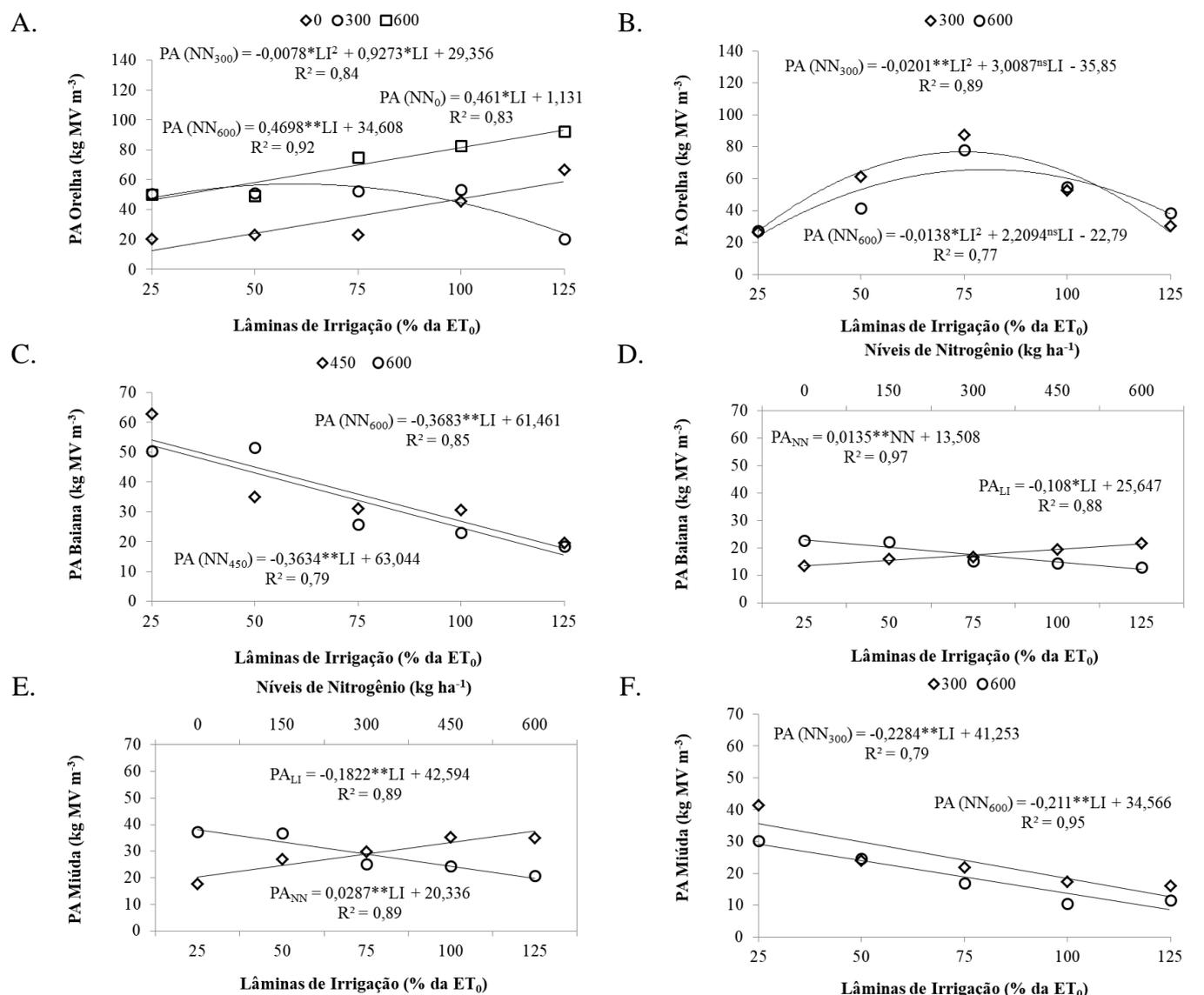
^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

Silva et al. (2020) trabalhando com a eficiência de uso da água da palma forrageira no semiárido do Brasil, notaram que as lâminas de irrigação e os níveis de nitrogênio aplicados interviram na produtividade da água e de massa verde da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, mesmo resultado desse estudo, pois, as LI e NN influenciaram a PA das cultivares de palma forrageira.

Silva et al. (2014) constataram diferença a $p < 0,05$ entre os clones de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, IPA Sertânia e Miúda, no entanto, a Orelha alcançou maior eficiência no uso da água. Nesse sentido, essa pesquisa também obteve maior produtividade da água na cultivar Orelha, conforme média geral da Tabela 7.

Todos os desdobramentos das interações entre as fontes de variação lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio para a cultivar Orelha aos 12 e 18 MAP, Baiana aos 12 MAP

e Miúda aos 18 MAP, e médias das fontes de variação isoladas para as cultivares Baiana aos 18 MAP e Miúda aos 12 MAP encontram-se na Figura 5.



cv./NN	ns Médias da PA (kg m ⁻³) aos 12 meses					ns Médias da PA (kg m ⁻³) aos 18 meses					
	0	150	300	450	600	0	150	300	450	600	
Orelha	-	45,0	-	44,6	-	Orelha	30,6	41,7	-	48,4	-
Baiana	21,0	27,9	32,3	-	-	Baiana	13,5	16,7	16,1	19,6	21,9
Miúda	17,7	29,8	35,1	26,9	35,1	Miúda	13,9	24,3	-	21,3	-

Figura 5. Produtividade da água (PA) da palma forrageira Orelha aos 12 (A) e 18 MAP (B), Baiana aos 12 (C) e 18 MAP (D), e Miúda aos 12 (E) e 18 MAP (F) em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio. ^{ns} - médias não significativas P<0,05 pelo Teste F.

A maior produtividade da água (93,3 kg MV m⁻³) foi obtida a partir da interação entre LI de 125% da ET₀ com NN de 600 kg ha⁻¹ de N aos 12 MAP, enquanto que, aos 18 MAP a combinação entre LI de 74,8% da ET₀ com 300 kg ha⁻¹ de N resultou em 76,7 kg de massa

verde por m^{-3} de água para a cultivar Orelha (Figura 5A e B). Estas lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio são semelhantes às da produtividade de massa verde.

A produtividade da água da cultivar Baiana reduziu com o aumento da LI, com a maior PA ($53,9 \text{ kg MV m}^{-3}$) alcançada aos 25% da ET_0 com 600 kg ha^{-1} de N aos 12 MAP. Aos 18 MAP o fator isolado LI de 25% da ET_0 forneceu $22,9 \text{ kg MV m}^{-3}$, ao passo que, o NN de 600 kg ha^{-1} de N proporcionou $21,6 \text{ kg}$ de biomassa verde por m^{-3} de água (Figura 5C e D).

O incremento na LI diminuiu a produtividade da água da cultivar Miúda aos 12 MAP, onde a maior PA ($38,0 \text{ kg MV m}^{-3}$) foi observada quando se aplicou 25% da ET_0 . O aumento do NN incrementou a PA, sendo a maior média ($37,5 \text{ kg MV m}^{-3}$) constatada com 600 kg ha^{-1} de N. Comportamento semelhante foi percebido aos 18 MAP, onde o incremento na LI reduziu a PA, e sua maior produtividade da água ($35,5 \text{ kg MV m}^{-3}$) com aplicação de 25% da ET_0 com 300 kg ha^{-1} de N (Figura 5E e F).

É possível notar que, a lâmina de irrigação de 125% da ET_0 com 600 kg ha^{-1} de nitrogênio elevou ao máximo o número de cladódios, a produtividade de massa verde e a produtividade da água da palma forrageira. A lâmina de irrigação de 25% da ET_0 maximizou a produtividade da água das cultivares Baiana e Miúda. Da mesma maneira que, ocorreu com o NC e PBV, a aplicação de níveis de nitrogênio superior a 300 kg ha^{-1} favoreceu o aumento da produtividade da água da palma forrageira.

Silva et al. (2014) em estudo desenvolvido em condições de sequeiro do semiárido brasileiro constataram produtividade da água da palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana de $11,2 \text{ kg MV m}^{-3}$; IPA Sertânia de $10,11 \text{ kg MV m}^{-3}$; e Miúda $7,8 \text{ kg MV m}^{-3}$. Os resultados destes autores são inferiores aos obtidos no presente estudo, uma causa possível pode ser o cultivo em condições de sequeiro, uma vez que, no cultivo irrigado a produção de massa verde é maior, e conseqüentemente, a produtividade da água.

Ao analisar a produtividade de colmos da cana de açúcar (metabolismo C4) Silva et al. (2019), verificaram maior eficiência de uso da água de $13,5 \text{ kg m}^{-3}$, com a inserção de uma lâmina de irrigação total de $1.606,2 \text{ mm}$. Este resultado é menor aos desse estudo, o que indica que a palma forrageira pode ter maior eficiência fotossintética quando comparada aos metabolismos C4 e C3. De acordo com Lima et al. (2016) torna-se difícil encontrar outra cultura que proporcione uma eficiência de uso de água próxima à da palma forrageira.

4.4.7. Eficiência de uso do nitrogênio extraído

A Figura 6 apresenta a eficiência de uso do nitrogênio extraído (EUNE) em função dos níveis de nitrogênio aplicado durante o cultivo da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda aos 12 meses após o plantio (MAP).

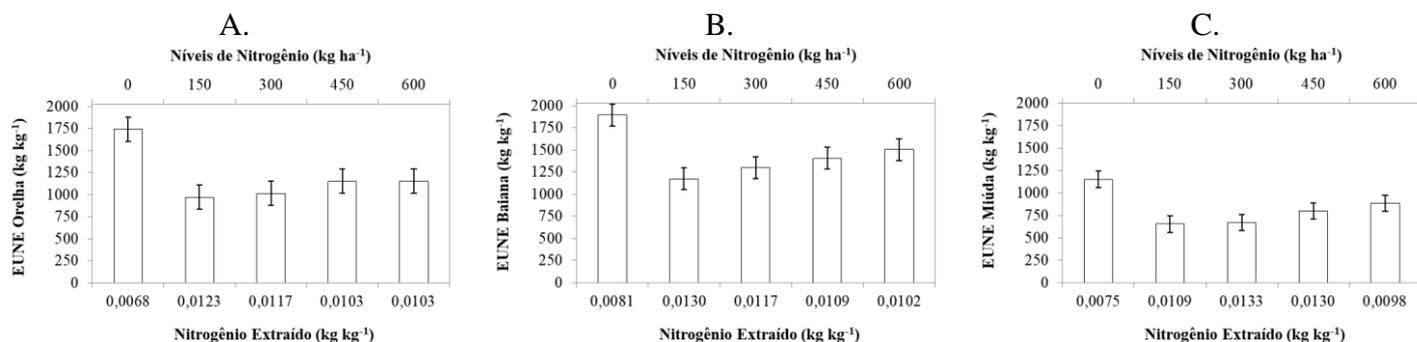


Figura 6. Eficiência de uso do nitrogênio extraído (EUNE) da palma forrageira Orelha (A), Baiana (B) e Miúda (C) em função dos níveis de nitrogênio aos 12 MAP.

A cultivar de palma forrageira Miúda extraiu a maior quantidade de nitrogênio por kg de massa seca (0,0133 kg kg⁻¹) no nível de 300 kg ha⁻¹ de N, seguida da Baiana (0,0130 kg kg⁻¹) e Orelha (0,0123 kg kg⁻¹) ambas no nível de 150 kg ha⁻¹ de N, na medida em que, a cv. Orelha extraiu a maior quantidade de nitrogênio por hectare (390,6 kg ha⁻¹) no nível de 600 kg ha⁻¹ de N, acompanhada da miúda (324,6 kg ha⁻¹) e Baiana (156,2 kg ha⁻¹) ambas no nível de 300 kg ha⁻¹ de N. A maior extração de nitrogênio por hectare da cultivar Orelha pode ser justificada pelo elevado número de cladódios e produtividade de massa verde no NN de 600 kg ha⁻¹.

Nos estudos de Silva et al. (2012) sobre a composição mineral em cladódios de palma forrageira Gigante (*Opuntia ficus-indica* Mill) adubada com 200 kg ha⁻¹ de N aos 390 dias após o plantio, identificaram o teor de nitrogênio nos cladódios de 0,0147 kg kg⁻¹ e extração total de 299,25 kg ha⁻¹ de nitrogênio. A quantidade de nitrogênio extraído da massa seca é semelhante ao do presente estudo, no entanto, a extração total de N por hectare é menor do que a cv. Orelha e mais semelhante à quantidade da Baiana e Miúda do presente estudo.

Os maiores valores de EUNE foram das plantas adubadas com 0 kg ha⁻¹ de nitrogênio, e os menores quando se aplicou 150 kg ha⁻¹ de N. A maior EUNE no NN de 0 kg ha⁻¹ se deve ao fato deste tratamento não ter recebido a aplicação de fontes externas de nitrogênio. A cultivar de palma forrageira Baiana proporcionou a maior EUNE (1893,7 kg de massa verde por kg⁻¹ de N), seguida da Orelha (1743,0 kg kg⁻¹) e Miúda (1149,8 kg kg⁻¹), isto significa que, para cada 1,0 kg de N extraído a cv. Baiana produziu 1893,7 kg de massa verde.

Nesse sentido, Silva et al. (2020) relatam que a palma forrageira Orelha aumentou sua capacidade de absorver e utilizar o nitrogênio do solo conforme o incremento dos níveis de nitrogênio aplicadas no solo, e com isso, aumentou a produtividade. Estes resultados corroboram com o presente estudo, pois o acréscimo nos níveis de nitrogênio a partir de 150 kg ha⁻¹ elevou a eficiência de uso do nitrogênio extraído da palma forrageira.

4.5. CONCLUSÕES

A lâmina de irrigação de 125% da ET₀ teve maior influencia sobre as variáveis analisadas das cultivares Orelha e Baiana.

O máximo rendimento obtido para a cultivar Miúda ocorreu por meio da lâmina de irrigação de aproximadamente 75% da ET₀.

Os níveis de nitrogênio aplicados acima de 300 kg ha⁻¹ proporcionaram máximo desempenho da palma forrageira em crescimento e produtividade.

A produtividade de massa verde das cultivares Orelha de elefante (680,0 t ha⁻¹) e Baiana (647,7 t ha⁻¹) foram superiores na colheita aos 12 MAP; para a cultivar Miúda (254,0 t ha⁻¹) na colheita aos 18 MAP.

A cultivar Orelha de Elefante resultou em alta produtividade da água de 93,3 kg de massa verde por m⁻³ de água e, extraiu a maior quantidade de nitrogênio 390,6 kg ha⁻¹.

A cultivar Baiana produziu a maior quantidade de massa verde em função do nitrogênio extraído, com eficiência de uso do nitrogênio extraído de 1893,7 kg de massa verde por kg⁻¹ de nitrogênio extraído.

O aumento da disponibilidade de água e nitrogênio no solo favoreceu o crescimento e produtividade da palma forrageira no semiárido do Brasil.

Por isso, recomenda-se ao produtor rural cultivar a palma forrageira Orelha de elefante irrigando 125% da ET₀ e fertilizando com 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio para obtenção de maior número de cladódios e produtividade de massa verde.

4.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56), 1998. 300p.
- Barros, J.L.; Donato, S.L.R.; Gomes, V.M.; Donato, P.E.R.; Silva, J.A.; Padilha Júnior, M.C. Palma forrageira ‘gigante’ cultivada com adubação orgânica. **Revista Agrotecnologia**, v.7, n.1, p.53-65, 2016.

- Borges, V. E. **Fertirrigação nitrogenada de palma forrageira resistente à Cochonilha do Carmin**. 2018. 57 f. Dissertação (Dissertação em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.
- Cruz Neto, J.F.; Morais, J.E.F.; Souza, C.A.A.; Carvalho, H.F.S.; Rodrigues, C.T.A.; Silva, T.G.F. Aplicabilidade de indicadores agrometeorológicos para análise do incremento de água por irrigação em sistemas de produção da palma forrageira, cv. Miúda. **Journal of Environmental Analysis and Progress**, v.02, n.02, p.98-106, 2017.
- Cunha, D.N.F.V.; Gomes, E.S.; Martuscello, J.A.; Amorim, P.L.; Silva, R.C.; Ferreira, P.S. Morfometria e acúmulo de biomassa em palma forrageira sob doses de nitrogênio. **Revista Brasileira de Saúde e Produção Animal**, v.13, n.4, p.1156-1165, 2012.
- Dantas, S.F.A.; Lima, G.F.C.; Mota, E.P. Viabilidade econômica da produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido Potiguar. **Revista iPecege**, v.3, n.1, p.59-74, 2017.
- Donato, P.E.R.; Pires, A.J.V.; Donato, S.L.R.; Bonomo, P.; Silva, J.A.; Aquino, A.A. Morfometria e rendimento da palma forrageira ‘Gigante’ sob diferentes espaçamentos e doses de adubação orgânica. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.9, n.1, p.151-158, 2014.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. 353p.
- Ferraz, R. L. S. **Palma forrageira fertirrigada no semiárido brasileiro: estimativa meta-analítica da produtividade, estado nutricional e composição bromatológica**. 2018. 111 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, PB, 2018.
- Ferreira, D.F. Sisvar: A guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.2, p.109-112, 2014.
- Flores-Hernández, A.; Castillo, I.O.; Amador, B.M.; Hernández, J.L.G.; Troyo-Diequez, E. Yield and physiological traits of prickly pear cactus ‘nopal’ (*Opuntia* spp.) cultivars under drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v.70, n.2, p.97-107, 2004.
- Guan, D.H.; Zhang, Y.S.; Mahdi, M.A.; Wang, Q.Y.; Zhang, M.C.; Li, Z.H. Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. **Soil and Tillage Research**, v.146, p.286-295, 2015.
- Lawlor, D.W. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: mechanisms are the key to understanding production systems. **Journal of Experimental Botany**, v.53, n.370, p.773-787, 2002.

- Leite, M. L. M. V. **Avaliação de clones de Palma forrageira submetidos a adubações e sistematização de informações em propriedades do Semiárido paraibano**. Tese de Doutorado, Universidade Federal da Paraíba, Areia, Paraíba, Brasil. 2009, 186p.
- Lima, A. S.; Silva, P. F.; Matos, R. M.; Bonou, S. I.; Dantas Neto, J. Determinação da área de cladódios e fator de correção da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.14, n.1, p. 3803-3815, 2020.
- Lima, G.F.C.; Rego, M.M.T.; Dantas, F.D.G.; Lôbo, R.N.B.; Silva, J.G.M.; Aguiar, E.M. Morphological characteristics and forage productivity of irrigated cactus pear under different cutting intensities. **Revista Caatinga**, v.29, n.2, p.481-488, 2016.
- Malavolta, E.; Vitti, G.C.; Oliveira, S.A. **Avaliação do estado Nutricional das plantas: princípios e aplicações**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato, 201p. 1989.
- Mantovani, E.C.; Bernardo, S.; Palaretti, L.F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 3. ed atual e ampliado. 2012. 355p.
- Merwer, L.L.V.D.; Wessels, A.B.; Fer-Reira, D.I. Supplementary irrigation for spineless cactus pear. **Acta Horticulturae**, v.438, p.77-81, 1997.
- Moll, R.H.; Kamprath, E.J.; Jackson, W.A. Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency of nitrogen utilization. **Agronomy Journal**, v.74, n.3, p.562-564, 1982.
- Nobel, P. S. Biologia Ambiental. In: Barbera, G.; Inglesa, P.; Pimienta-Barrios, E. (Eds.) **Agroecologia, cultivo e usos da palma forrageira**. João Pessoa: SEBRAE/PB, p. 36-48. 2001.
- Pereira, L.S.; Cordery, I.; Iacovos, I. Improved indicators of water use performance and productivity for sustainable water conservation and saving. **Agricultural Water Management**, v.108, p.39-51, 2012.
- Pereira, P.C.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Morais, J.E.F.; Santos, D.C. Morfogênese da palma forrageira irrigada por gotejamento. **Revista Caatinga**, v.28, n.3, p.184-195, 2015.
- Pinheiro, K. M.; Silva, T. G. F.; Carvalho, H. F. S.; Santos, J. E. O.; Morais, J. E. F.; Zolnier, S.; Santos, D. C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Pesq. agropec. bras.**, v.49, n.12, p.939-947, 2014.
- Queiroz, M.G.; Silva, T.G.F.; Zolnier, S.; Silva, S.M.S.; Lima, L.R.; Alves, J.O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes

- lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.10, p.931-938, 2015.
- Ramos, J.P.R.; Leite, M.L.M.V.; Oliveira Júnior, S.; Nascimento, J.P.; Santos, E.M. Crescimento vegetativo de *opuntia ficus-indica* em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Caatinga**, v.24, n.3, p.41-48, 2011.
- Rocha, R.S.; Voltolini, T.V.; Gava, C.A.T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Archivos de Zootecnia**, v.66, n.255, p.365-373, 2017.
- Rodriguez, J. L. **Atlas Escolar Paraíba**. João Pessoa: Editora Grafset, 2002.
- Santos, D.C.; Farias, I.; Lira, M.A.; Santos, M.V.F.; Arruda, G.P.; Coelho, R.S.B.; Dias, F.M.; Melo, J.N. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia e Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: IPA. (IPA. Documentos, 30), 2006. 48p.
- Santos, M.A.L.; Lima, D.F.; Santos, M.A.A.; Santos, R.; Barreto, J.A.S.; Santos, D.P. Desenvolvimento da palma forrageira em função de lâminas de irrigação e níveis de adubação orgânica. IV INOVAGRI International Meeting. **Anais...**, Fortaleza - CE, 2017.
- Silva, D.S.; Andrade, A.P.; Leite, M.L.M. 2010. **Palma forrageira e sustentabilidade do semiárido brasileiro**. In: Ximenes, L.J.F.; Martins, G.A.; Morais, O.R. Costa, L.S.A.; Nascimento, J.L.S. Ciência e tecnologia na pecuária de caprinos e ovinos. Fortaleza v.5. BNB Ciência e Tecnologia, Fortaleza, Ceará, Brasil, 2010. p.71-103.
- SILVA, N.G. M.; LIRA, M. A.; SANTOS, M.V.F.; DUBEUX JÚNIOR, J.C.B.; MELLO, A.C.L.; SILVA, M. C. Relação entre características morfológicas e produtivas de clones de palma-forrageira. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.39, p.2389-2397, 2010.
- Silva, E.M.P.; Andrade Júnior, A.S.; Bastos, E.A.; Ribeiro, V.Q. produtividade de colmos e eficiência do uso da água em cana-de-açúcar irrigada por gotejamento subsuperficial. **Irriga**, v.24, n.1, p.162-176, 2019.
- Silva, J.A.; Bonomo, P.; Donato, S.L.R.; Pires, A.J.V.; Rosa, R.C.C.; Donato, P.E.R. Composição mineral em cladódios de palma forrageira sob diferentes espaçamentos e adubações química. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.7, suplemento, p.866-875, 2012.
- Silva, J.G.M.; Rêgo, M.M.T.; Lima, G.F.C.; Silva, G.J.A.M.; Guedes, F.X.; Lôbo, R.N.B. Características morfológicas e produção de matéria seca da palma forrageira cv. gigante adensada submetida à adubação nitrogenada. 48^a Reunião Anual da Sociedade Brasileira de Zootecnia. **Anais...**, Belém - PA, 18 a 21 de Julho de 2011.

- Silva, L.M.; Fagundes, J.L.; Viegas, P.A.A.; Muniz, E.N.; Rangel, J.H.A.; Moreira, A.L.; Backes, A.A. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. **Ciência Rural**, v.44, n.11, p.2064-2071, 2014.
- Silva, N.G.M.; Lira, M.A.; Santos, M.V.F.; Dubeux Jr., J.C.B.; Mello, A.C.L.; Silva, M.C. Relação entre características morfológicas e produtivas de clones de palma forrageira. **Brazilian Journal of Animal Science**, v.39, n.11, p.2389-2397, 2010.
- Silva, P.F. **Crescimento e produtividade de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada**. 2017. 66f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB, 2017.
- Silva, P.F.; Matos, R.M.; Dantas Neto, J.; Borges, V.E.; Sobrinho, T.G.; Bonou, S.I.; Azevedo, C.A.V.; Lima, V.L.A.; Melo Júnior, A.P. Water and nitrogen water use efficiency in forage palm irrigated with salt water in the Neossolo. **Australian Journal of Crop Science**, v. 14, n. 04, p. 683-690, 2020.
- Silva, T.G.F.; Araújo Primo, J.T.; Moraes, J.E.F.; Diniz, W.J.S.; Souza, C.A.A.; Silva, M.C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v.28, n.2, p.10-18, 2015.
- Silva, T.G.F.; Primo, J.T.A.; Silva, S.M.S.; Moura, M.S.B.; Santos, D.C.; Silva, M.C.; Araújo, J.E.M. Indicadores de eficiência do uso da água e de nutrientes de clones de palma forrageira em condições de sequeiro no Semiárido brasileiro. **Bragantia**, v.73, n.2, p.184-191, 2014.
- Suassuna, P. **Lucratividade da Cultura da Palma Forrageira na Paraíba**. 1993. Disponível em:<www.joaosuassuna.hpg.ig.com.br/sistprod.htm-5k->. Acesso em 16 de outubro de 2017.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Taiz, L.; Zieger, E. **Fisiologia vegetal**. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2016. 719p.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artemed, 2013. 954p

5. CAPÍTULO II

5.1. FUNÇÃO DE PRODUÇÃO E ANÁLISE ECONÔMICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB LÂMINAS DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA

RESUMO

A análise econômica da produtividade da cultura é importante para determinar a quantidade dos insumos que proporcionam a máxima receita líquida e a relação custo benefício do investimento. Assim, esse estudo objetiva determinar a função de produção e a análise econômica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada em condições semiáridas. O experimento foi desenvolvido em condições de campo no município de Santa Luzia - PB. O delineamento em blocos ao acaso em esquema fatorial 5 x 5, constituído de cinco lâminas de irrigação (25; 50; 75; 100 e 125% da evapotranspiração de referência (ET_0)), cinco níveis de adubação nitrogenada (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Este delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante; Baiana e Miúda). Neste experimento foram analisadas a função de produção da palma forrageira sob restrição de água, a lâmina de água que maximiza a produção, a produtividade de massa verde máxima e a análise econômica de forma individual para cada cultivar de palma forrageira. A produção de palma forrageira irrigada e adubada no semiárido é uma atividade promissora e economicamente viável. De acordo com as premissas definidas, as ferramentas utilizadas para a definição da viabilidade do cultivo de palma forrageira, possibilitam a verificação da viabilidade do investimento, pois apresentam Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno positivas. A lâmina total de água que maximiza a produtividade de 779,0 mm associada a maior dose de nitrogênio proporcionou a maior produtividade de massa verde máxima, obtendo-se maior receita líquida e, com isso, melhor razão benefício custo na cultivar Orelha de Elefante. A partir disso, recomenda-se então o cultivo da palma forrageira Orelha de Elefante irrigada com lâmina de 779,0 mm e adubada com 600,0 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

PALAVRAS-CHAVE: Cactacea, custos de produção, produtividade máxima e receita líquida.

PRODUCTION FUNCTION AND ECONOMIC ANALYSIS OF FORAGE PALM UNDER IRRIGATION BLADES AND NITROGEN FERTILIZATION

ABSTRACT

Economic analysis of crop productivity is important to determine the quantity of inputs that provide the maximum net revenue and the cost benefit ratio of the investment. Thus, this study aims to determine the production function and economic analysis of forage palm under irrigation and nitrogen fertilization in semiarid conditions. The experiment was carried out under field conditions in the municipality of Santa Luzia - PB. The randomized block design in a 5 x 5 factorial scheme, consisting of five irrigation depths (25; 50; 75; 100 and 125% of the reference evapotranspiration (ET_0)), five levels of nitrogen fertilization (0; 150; 300 ; 450 and 600 kg ha⁻¹ of N) and three replications. This design was used for three cultivars of forage palm (Elephant Ear; Baiana and Miúda). In this experiment, the production function of the forage palm under water restriction, the water depth that maximizes production, the maximum green mass productivity and the economic analysis individually for each cultivar of forage palm were analyzed. The production of irrigated and fertilized forage palm in the semiarid region is a promising and economically viable activity. According to the assumptions defined, the tools used to define the viability of growing forage palm make it possible to verify the viability of the investment, as they present positive Net Present Value and Internal Rate of Return. The total water depth that maximizes the productivity of 779.0 mm associated with a higher dose of nitrogen provided the highest productivity of maximum green mass, obtaining greater net revenue and, with this, better cost benefit ratio in the cultivar Elephant Ear. Thereafter, it is recommended to cultivate the Elephant Ear forage palm irrigated with a 779.0 mm blade and fertilized with 600.0 kg ha⁻¹ of nitrogen.

KEY WORDS: Cactacea, production costs, maximum productivity and net revenue.

5.2. INTRODUÇÃO

As empresas agrícolas utilizam as funções de produção das culturas como fonte valiosa para o planejamento e a tomada de decisão, pois, através desta função é possível determinar a quantidade física alcançada por determinado produto a partir da quantidade física dos fatores de produção utilizados em um determinado período de tempo (FRIZZONE et al., 1995; VASCONCELLOS, 2007).

Alencar et al. (2009) afirmam que, a utilização dos insumos de produção, tais como irrigação e fertilização nitrogenada, dependerá do ambiente e da relação custo/benefício que estes fatores de produção trarão ao produtor, assim sendo, torna-se de suma importância para uma propriedade agrícola a quantificação da lâmina de água, bem como da dose de adubação nitrogenada que propicie a maior receita líquida.

Em termos econômicos a implantação e a operação de sistemas de irrigação e o manejo adequado da adubação nitrogenada atendendo a marcha de absorção das culturas acarretam custos elevados e, em contrapartida, a máxima produtividade física não corresponde à maior receita líquida, por causa da complexidade da resposta das culturas, flutuabilidade econômica dos fatores de produção e das próprias condições climáticas (ALGOZIN et al., 1988).

Para Silva et al. (2016) e Silva (2017) a sazonalidade na oferta de forragens é um fator importante a ser considerado na região semiárida, que em função da irregularidade na distribuição das chuvas associada a baixa fertilidade dos solos, leva os produtores a enfrentar graves problemas com a dizimação dos rebanhos pela baixa oferta de forragens e água. Nesse sentido, a palma forrageira por ser uma cactácea adaptada às condições edafoclimáticas da região surgiu como alternativa viável, visando à suplementação alimentar dos rebanhos (DUBEUX JÚNIOR et al., 2010).

O manejo da fertilidade do solo, a prática da adubação, o conhecimento das exigências nutricionais, os efeitos da irrigação e do clima são fatores de grande importância para a prática do manejo da palma forrageira na região semiárida que refletem na maior ou menor produção e conseqüentemente, na lucratividade do empreendimento rural (SILVA et al., 2016; SILVA, 2017; DIAS FILHO, 2011).

A maior parte da literatura nacional indica recomendações genéricas para o produtor a respeito do cultivo de palma forrageira e praticamente inexitem relatos sobre a função de produção e da análise econômica da cultura para a região semiárida envolvendo irrigação e fertilização. Nesse sentido, os resultados de pesquisas podem embasar informações para a palma forrageira que poderão torna-las tanto viável quanto inviáveis do ponto de vista

econômico, uma vez que, a máxima produtividade nem sempre corresponde com o ponto ótimo econômico.

Dada à relevância desta temática, objetiva-se a partir desse estudo determinar a função de produção e a análise econômica da palma forrageira sob lâminas de irrigação e adubação nitrogenada cultivada no semiárido brasileiro.

5.3. MATERIAL E MÉTODOS

5.3.1. Caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido em condições de campo, entre maio de 2015 e junho de 2016, na fazenda Poço Redondo, no município de Santa Luzia, situado na microrregião do Seridó ocidental paraibano, latitude 06° 52' 27", longitude 36° 56' 00" WGr e altitude média 299 m. Essa região encontra-se localizada na Mesorregião da Borborema, possui clima do tipo Bsh-Tropical, quente e seco, semiárido com chuvas de verão.

A principal característica do clima da região do Seridó ocidental paraibano não é a ausência de precipitação, mas sim a sua irregularidade (RODRIGUES, 2002). Silva (2017) descreveu que a região possui uma temperatura do ar média anual de 27,6 °C, sendo a máxima de 33,0 °C e mínima de 22,3 °C, com a umidade relativa do ar oscilando entre 50 a 70% e a precipitação média anual de 500 mm.

Com a vegetação predominante do tipo Caatinga-Seridó, subxerófila, decídua, caracterizada por possuir em sua maioria cactos e pequenas árvores ou arbustos, frequentemente espinhosos, compostos de agrupamentos ora densos, ora com árvores esparsas (SILVA, 2017).

5.3.2. Delineamento experimental e sistema de plantio

O experimento realizou-se em delineamento experimental de blocos ao acaso em esquema fatorial 5 x 5, constituído de cinco lâminas de irrigação (25; 50; 75; 100 e 125 da ET₀); cinco doses de adubação nitrogenada (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Esse delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante Mexicana (Orelha) (*Opuntia stricta* (Haw.) Haw.); IPA-Sertânia (Baiana) e Miúda, ambas *Nopalea cochenillifera* Salm Dyck). Essas cultivares foram adotadas por serem resistentes à cochonilha do carmim (*Dactylopius opuntia* e *Cockerell*), atualmente, considerada a principal praga da palma forrageira no semiárido brasileiro.

A parcela experimental composta por uma fileira dupla de plantas, com espaçamento de 0,4 m entre linhas; 2,0 m entre fileiras duplas; 0,25 m entre plantas; 5 m de comprimento e

bordadura de 1 m. Cada parcela possui área de 14,4 m², sendo a área útil de 0,6 m², área total de 3.850 m² e densidade de plantio para um hectare de 33.333 mil plantas. As parcelas referentes à lâmina de 100% da ET₀ possuíam área equivalente ao dobro das demais.

Todas as parcelas do experimento foram adubadas na fundação com fósforo e potássio, seguindo as recomendações de Santos et al. (2006) e o resultado da análise do solo. O processo de fertirrigação realizado mensalmente com auxílio de um injetor de fertilizante do tipo Venturi, utilizando a ureia como fonte de nitrogênio (45% de N). A adubação orgânica através do esterco bovino, aplicando 1,0 kg por metro linear, com base no que recomenda Santos et al. (2006).

No plantio da palma forrageira foram utilizadas raquetes isentas de pragas e doenças, entre elas, a cochonilha-de-escamas (*Diaspis echinocacti*). Estas raquetes passaram por período de cura à sombra, onde o cladódio perde parte de sua umidade, ocorrendo à cicatrização das lesões provocadas pela operação de corte no campo. Elas foram plantadas em sulco com alinhamento bilateral (Dominó), de frente para o sol e enterradas 50% com inclinação de 45° (SUASSUNA, 1993). O início da aplicação dos tratamentos teve início com dois meses após o plantio das raquetes no campo.

5.3.3. Sistema e manejo da irrigação

A irrigação realizada através de um sistema de gotejamento, com tubo gotejador integrado a tubulação de diâmetro interno de 16 mm; espessura da mangueira de 0,2 mm; espaçamento entre emissores de 0,20 m; pressão nominal de 7 m.c.a; vazão de 6,0 L h⁻¹ m⁻¹; e equação do emissor $q = 0,46 \times p^{0,5}$.

A água para ser aplicada através da irrigação foi captada de um poço amazonas, localizado a 80 m de distância da área experimental. Duas vezes por semana aplicou-se a lâmina de irrigação (LI) com base na evapotranspiração de referência, sendo a lâmina a ser aplicada em cada tratamento determinada pela Equação 1.

$$LB = \left(\frac{ET_0 \cdot LAP}{Ea} \right) - P \quad (1)$$

Em que: LB - lâmina bruta a ser aplicada em cada tratamento (mm); ET₀ - evapotranspiração de referência (mm); LAP - fração da lâmina a ser aplicada em cada tratamento (decimal); P - precipitação ocorrida no período (mm); e Ea - eficiência de aplicação do sistema de irrigação (decimal).

O cálculo da intensidade de aplicação do sistema de irrigação seguiu a metodologia proposta por Mantovani et al. (2012), que está expressa a Equação 2.

$$Ia = \frac{Ne.q}{A} \quad (2)$$

Em que: Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}); Ne - número de emissores por planta; q - vazão média dos emissores ($1,21 \text{ L h}^{-1}$); e A - área ocupada pela planta ($0,30 \text{ m}^2$).

A partir do método de Mantovani et al. (2012), estimou-se o tempo de irrigação necessário para aplicar a lâmina de irrigação em cada tratamento, conforme a Equação 3.

$$Ti = \frac{LB}{Ia} \quad (3)$$

Em que: Ti – tempo de aplicação da irrigação (h); LB - lâmina de irrigação bruta (mm); e Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}).

5.3.4. Determinação da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência diária (ET_0), por sua vez, procedeu por meio da metodologia proposta por Penman-Monteith, recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998), Equação 4. Já os dados meteorológicos foram obtidos a partir de uma estação meteorológica automática instalada próxima a área experimental.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

Em que: ET_0 - evapotranspiração de referência (mm dia^{-1}); R_n - saldo diário da radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G - fluxo diário de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 - velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s - pressão de saturação do vapor d'água média (kPa); e_a - pressão de vapor média (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

5.3.5. Função de produção da palma forrageira sob restrição de água

5.3.5.1. Determinação do modelo contendo um fator

Os dados de produtividade de massa verde da palma forrageira em função das lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio foram submetidos à análise de regressão múltipla, onde se

utilizou o modelo de segundo grau contendo um fator como variável independente para obtenção da curva de resposta (FRIZZONE, 1993).

Segundo Frizzone & Andrade Júnior (2005) e conforme a Equação 5, o modelo proposto contendo um único fator como variável independente (lâmina de irrigação) é um polinômio do segundo grau.

$$Y = f(LI) = a + b.LI + c.LI^2 \quad (5)$$

Em que: Y - produtividade da cultura (kg ha^{-1}); LI - nível do fator água em mm (variável independente); e a, b, c - coeficientes da função de produção.

5.3.5.2. Determinação da lâmina de água que maximiza a produção

A partir de Frizzone & Andrade Júnior (2005), estabeleceu-se a lâmina de água que maximiza a produção da palma forrageira e proporciona a máxima receita bruta, como representada na Equação 6.

$$LIm = \frac{b}{2.c} \quad (6)$$

Em que: LIm - lâmina de água que maximiza a produtividade (mm); e b, c - determinados na Equação 5.

5.3.5.3. Determinação da produtividade de massa verde máxima

A Equação 7 indicou a produtividade de massa verde máxima (PMVm) em função da LIm.

$$PMVm = a + b.LIm + c.LIm^2 \quad (7)$$

Em que: PMVm - produtividade de massa verde máxima na lâmina de água que maximiza a produção (kg ha^{-1}); LIm - lâmina de água que maximiza a produtividade (mm); e a, b, c - determinados na Equação 5.

5.3.5.4. Determinação dos custos de produção

Durante o ciclo de cultivo da palma forrageira, foram anotados as quantidades e os custos de aplicação dos insumos para estabelecimento da curva de melhor resposta física e econômica da cultura à aplicação dos insumos água e adubação, como indica a metodologia de Frizzone (1993), descrita a seguir:

P_y - preço unitário de venda da massa verde da palma forrageira (R\$ kg⁻¹);

C_w - custo de uma unidade do insumo água (R\$ mm⁻¹ ha⁻¹); e

C_0 - custo parcial da palma forrageira (R\$ ha⁻¹).

O preço de venda da palma forrageira (P_y) é o comercializado na região. O custo de uma unidade do insumo água (C_w) foi calculado com base no preço de uma hora de funcionamento do sistema de irrigação, para aplicar a vazão necessária para um hectare, e o custo de uma unidade do insumo nitrogênio (C_N) é o comercializado na região mais os custos com aplicação.

O custo parcial (C_0) levou em conta todos os custos de produção, como mão de obra, colheita, encargos, EPI, transporte, remuneração de capital e insumos para tratamentos culturais, com exceção dos relacionados com os insumos água e nitrogênio, considerando que os custos relativos à colheita variam de acordo com cada tratamento, conforme a Equação 8.

$$C_0 = C_i + (C_c \cdot PMVm) \quad (8)$$

Em que: C_0 - custo parcial, com exceção do insumo água (R\$ ha⁻¹); C_i - custos de produção, com exceção do insumo água e da colheita (R\$ ha⁻¹); C_c - custos com a colheita por cada unidade de palma forrageira (R\$ kg⁻¹); e $PMVm$ - produtividade de massa verde máxima na lâmina de água que maximiza a produção (kg ha⁻¹).

Partindo das indicações de Frizzone & Andrade Júnior (2005) chegou ao custo total de produção da palma forrageira, conforme a Equação 9.

$$C_T = C_0 + C_w * LIm \quad (9)$$

Em que: C_T - custo total de produção (R\$ ha⁻¹); C_0 - custo parcial, com exceção do insumo água (R\$ ha⁻¹); C_w - custo associado à lâmina de água aplicada (R\$ mm⁻¹ ha⁻¹); e LIm - lâmina de água que maximiza a produção (mm).

A receita líquida da venda da palma forrageira foi determinada conforme Frizzone & Andrade Júnior (2005), de acordo com a Equação 10.

$$R_L = P_y \cdot PMVm - C_T \quad (10)$$

Em que: R_L - receita líquida (R\$ ha⁻¹ e R\$ m⁻³); P_y - preço da palma forrageira (R\$ kg⁻¹); $PMVm$ - produtividade de massa verde máxima na lâmina de água que maximiza a produção (kg ha⁻¹); e C_T - custo total de produção (R\$ ha⁻¹).

O valor presente líquido serviu para analisar a rentabilidade do investimento no cultivo da palma forrageira, como expõe a Equação 11 (DANTAS et al., 2017).

$$VPL = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+k)^t} \quad (11)$$

Em que: VPL - valor presente líquido (R\$ ha⁻¹); I - Investimento inicial (R\$ ha⁻¹); t - período (anual); n - tempo total do projeto (três anos); k - taxa mínima de atratividade [TMA] (6% ao ano), comparada ao rendimento médio anual de aplicação do valor na poupança; e FC - fluxo de caixa por período (R\$ ha⁻¹).

A taxa interna de retorno foi necessária para avaliar a viabilidade do investimento no cultivo da palma forrageira, e por isso, determinada conforme a Equação 12 (DANTAS et al., 2017).

$$0 = -I + \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} \quad (12)$$

Em que: I - Investimento inicial (R\$ ha⁻¹); t - período (anual); n - tempo total do projeto (três anos); TIR - taxa interna de retorno (%); e FC - fluxo de caixa por período (R\$ ha⁻¹).

A razão benefício/custo foi utilizada para verificar se os benefícios são maiores do que os custos, para isso, empregou-se um conceito frequentemente utilizado que é a razão entre o valor presente dos benefícios e o valor presente dos custos, vide Equação 13, adaptada de Frizzone & Andrade Júnior (2005).

$$RBC = \frac{\sum_{t=1}^n B_t (1+TIR)^{-t}}{\sum_{t=1}^n C_t (1+TIR)^{-t}} \quad (13)$$

Em que: RBC - razão benefício/custo (adimensional); t - período (anual); n - tempo total do projeto (três anos); B_t - valor presente dos benefícios (R\$ ha⁻¹); C_t - valor presente dos custos (R\$ ha⁻¹); TIR - taxa interna de retorno (%);

Nesse viés, realizou-se uma simulação da receita líquida (R_L) para diferentes cenários de preços para a venda da massa verde de palma forrageira (Py), com valores de 0,05; 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 R\$ kg⁻¹, visando determinar o preço mínimo que proporciona a receita líquida positiva.

5.3.6 Análise estatística

Os dados de produtividade de massa verde da palma forrageira foram submetidos à análise de variância, teste F em nível de 1% e 5% de probabilidade. Os valores significativos passaram por análise de regressão linear e polinomial para o fator quantitativo lâminas de irrigação. A escolha dos modelos de regressão para cada tratamento se baseou na significância dos parâmetros de regressão.

As análises foram realizadas de forma individual para cada cultivar de palma forrageira, onde os procedimentos estatísticos foram feitos com o programa Sisvar (FERREIRA, 2014).

5.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.4.1. Lâmina total de água

Na Tabela 1 é possível visualizar a lâmina total de água utilizada no cultivo da palma forrageira determinada em função das lâminas de irrigação (LI) mais a precipitação efetiva (PE) aos 12 meses após o plantio (MAP). Nota-se, como já era esperado, que a lâmina total de água aplicada eleva-se a medida que se aumenta o percentual da evapotranspiração de referência, assim, quando se comparou a L1 que corresponde a 25% da ET_0 com a L5 correspondendo a 125% da ET_0 , se tem uma diferença de 296,9 mm.

Tabela 1. Lâmina total de água aplicada no cultivo da palma forrageira determinada em função das lâminas de irrigação mais precipitação efetiva aos 12 MAP.

Tratamento	LI (mm)	PE (mm)	LI + PE (mm)
L1	74,2	407,7	481,9
L2	148,4	407,7	556,1
L3	222,7	407,7	630,4
L4	296,9	407,7	704,6
L5	371,1	407,7	778,8

Legenda: LI – Lâminas de irrigação; PE – Precipitação efetiva; e LI + PE - Lâmina total de água.

Esses resultados estão de acordo com os de Silva et al. (2020), que observaram uma diferença entre a maior e menor lâmina de irrigação, aplicada na palma forrageira cultivar Orelha de elefante mexicana da ordem de 276,9 mm. Os autores afirmam ainda que, quanto mais água é fornecida a palma forrageira, maior será seu rendimento em termos de produção de cladódios e, conseqüentemente, maior a eficiência de utilização da água pelas plantas, a exemplo da área experimental estudada.

Queiroz et al. (2015) avaliando as características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação no semiárido do Brasil, relatam que a

diferença entre a menor e maior lâmina de irrigação foi da ordem de 226 mm. Resultado condizente com o observado nesse estudo, uma vez que, a diferença entre as lâminas de irrigação está na faixa de 200 a 300 mm.

Verifica-se ainda que, o incremento a cada 25% de ET_0 foi da ordem de 74,2 mm. A precipitação efetiva foi superior as lâminas de irrigação determinadas para essa pesquisa durante os doze meses (Tabela 1).

Queiroz et al. (2016) utilizando lâminas de irrigação entre 976 a 1202 mm observaram que, lâminas de irrigação iguais ou superiores a 1152 mm em cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana, não são utilizadas plenamente no processo de evapotranspiração, sendo que na lâmina de 1048 mm, houve um aumento dos valores de produtividade econômica da terra em termos de cladódio para semente, em decorrência do maior número de cladódios de primeira e segunda ordem, para esta lâmina. Esses dados diferem dos obtidos no presente trabalho, tendo em vista que as lâminas aplicadas foram bem inferiores as relatadas pelos autores.

Essa pesquisa alcançou uma média diária de evapotranspiração de referência da ordem de $4,96 \text{ mm dia}^{-1}$, ou seja, os valores são superiores aos de Consoli et al. (2013), no Mediterrâneo, Sicily, Itália, que encontraram $2,5 \text{ mm dia}^{-1}$, para a palma, *Opuntia ficus indica*, ao receber 1329,1 mm de água. Isso pode ser justificado pelas maiores temperaturas e radiações observadas.

Já Silva et al. (2020), relatam uma evapotranspiração de referência diária de 7,6 mm e uma precipitação no período de 446,9 mm, superiores aos desse estudo, mesmos sendo para a mesma região, com precipitação efetiva de 407,7 mm e a ET_0 diária inferior a 5 mm, por causa do método de estimativa da evapotranspiração de referência utilizado em cada estudo.

5.4.2. Produtividade de massa verde

Na tabela 2 apresenta-se o resumo da análise de variância para a produtividade de massa verde da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 meses após o plantio (MAP). A lâmina de irrigação influenciou de forma significativa ao nível de 1% pelo teste F a produtividade de massa verde da cultivar Orelha, no entanto, não se teve efeito significativo da lâmina de irrigação para as cultivares baiana e miúda.

Tabela 2. Resumo da análise de variância para a produtividade de massa verde da palma forrageira Orelha, Baiana e Miúda em função de diferentes lâminas de irrigação e níveis de nitrogênio aos 12 MAP.

Fontes de Variação (FV)	G.L.	----- Quadrado médio -----		
		PMV (t ha ⁻¹) 12 MAP		
		Orelha	Baiana	Miúda
Lâmina de Irrigação (LI)	4	32257,85**	5459,17ns	5534,61ns
Linear	1	68891,02**	2357,79ns	6140,16ns
Quadrática	1	22676,17ns	6316,25ns	48,29ns
Nível de Nitrogênio (NN)	4	152016,46**	23096,37**	28083,54**
Linear	1	474924,43**	77557,04**	56256,29**
Quadrática	1	18931,60**	14757,18*	16384,06*
LI x NN	16	27970,61**	11831,94**	3466,03ns
Bloco	2	19261,26	3352,33	622,71
Erro	48	6027,85	2656,40	3264,31
C.V. (%)	-	26,77	27,55	32,51
Média Geral	-	289,99	187,07	175,74

^{ns} - não significativo em nível de 0,05 de probabilidade pelo Teste F; * e ** significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente, pelo Teste F.

Ramos et al. (2011) afirmam que a produção de massa verde de palma forrageira é influenciada diretamente pela quantidade de água presente no solo, desse modo, quanto maior a lâmina de irrigação aplicada maior será a quantidade de massa verde em t ha⁻¹. Resultado condizente com ao obtido para cultivar Orelha. No entanto, cabe salientar que valores excessivos de água no solo podem prejudicar o desenvolvimento da cultura e assim, sua produtividade.

Candido et al. (2013) dizem que, a irrigação é fato primordial para a produção de biomassa verde, uma vez que, quanto maior a lâmina de irrigação fornecida, maior será o rendimento em termos de biomassa verde. Isso contribui para a redução da escassez de forragem além do fornecimento da suplementação de água aos animais na estação seca.

Os pesquisadores Queiroz et al. (2015), verificaram ausência de efeito significativo da lâmina de irrigação em palma forrageira, bem como a falta de efeito está atrelada à pequena diferença de lâminas entre os tratamentos (226 mm). Já Bajgain et al. (2015) afirmam que o excesso de água em cactáceas pode contribuir para o baixo consumo de água pelas plantas, isso se reflete em ausência de diferenciação entre os tratamentos.

Os níveis de nitrogênio influenciaram de forma significativa ao nível de 1% pelo teste F a produtividade de massa verde em (t ha⁻¹) das cultivares Orelha, Baiana e Miúda (Tabela 2). Silva et al. (2016) ao analisarem a morfologia e produção de biomassa de palma forrageira

sob fertilização mineral em solo orgânico observaram que, quando houve inserção do adubo com nitrogênio teve aumento na produtividade de biomassa verde da palma forrageira.

Para Taiz & Zaiger (2017), o nutriente mineral nitrogênio é essencial para todas as plantas e, especialmente, para as que usam o Metabolismo Acido das Crassuláceas - CAM, por ter mecanismo de concentração de CO₂, se processa com a presença de duas enzimas, a PEPcase e Rubisco, diferentemente de plantas C2 e C3, que utilizam apenas a rubisco. Além do mais, tem-se todos os complexos proteicos que formam as estruturas das clorofilas e dos cloroplastos.

Sobre a eficiência do uso de água e nitrogênio na palma forrageira irrigada com água salina Silva et al. (2020) estudando os mesmos níveis de nitrogênio, verificaram que a medida que se eleva o nível de nitrogênio aplicado ao solo, eleva-se a eficiência de utilização do nitrogênio, refletindo em maiores produtividades em massa seca de palma forrageira. Resultado similar ao obtido no presente estudo, fato que está atrelado a estreita relação entre fornecimento de nutrientes, especificamente o nitrogênio e a produção de biomassa pelas plantas.

Observou-se ainda que houve efeito da interação (LI x NN) para a variável produtividade de massa verde nas cultivares Orelha e Baiana (Tabela 2).

Para Barros et al. (2016), a interação entre a lâmina de irrigação versus os níveis de nitrogênio aplicado ao solo em palma forrageira, reflete em incrementos em termos de produtividade de biomassa verde, uma vez que, o fornecimento hídrico adequado atrelado ao manejo da adubação nitrogenada contribuem para alterar os aspectos fisiológicos da cultura e consequentemente, incrementa a produtividade em regiões semiáridas.

É possível verificar que dentre as cultivares estudadas, a Orelha foi a que apresentou maior produtividade de massa verde em 12 meses de cultivo (289,99 t ha⁻¹), seguida da Baiana e da Miúda (Tabela 2). Rocha et al. (2017) também apresentaram resultados parecidos com a Orelha de Elefante Mexicana, que evidenciou maior produtividade de massa verde em t de MV ha⁻¹.

A cultivar Orelha de Elefante, tem como característica relevante a alta taxa de acúmulo de biomassa, fato justificado pela sua maior área e espessura de cladódio, quando comparada as demais cultivares, já que, com uma área maior a planta pode apresentar maiores taxas fotossintéticas e consequentemente maiores produtividades.

Ramírez-Tobias et al. (2010) afirmam que, cladódios de palma forrageira menores propiciam menor área de absorção de CO₂ pela planta, destaca-se ainda que, a Orelha de

elefante mexicana possui elevada eficiência no uso da água (QUEIROZ et al., 2015; SILVA et al., 2020).

Silva et al. (2015) constataram que, a maior produtividade de massa verde da Orelha de Elefante quando comparada a Baiana e Miúda, está diretamente relacionada ao maior índice de área de cladódio (IAC) da Orelha de Elefante em relação aos demais. Lima et al. (2020), ao analisarem a determinação da área de cladódios e o fator de correção da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada observaram que, a área de cladódio da Orelha de Elefante é superior as cultivares Baiana e Miúda, fato que ajuda para que a Orelha de Elefante tenha maior produtividade de massa verde em $t\ ha^{-1}$.

5.4.3. Função de produção com um fator independente

5.4.3.1. Lâmina total de água como fator independente

Os modelos polinomiais para o fator independente água associado aos níveis de nitrogênio encontram-se nas equações 14 e 15, que representam a função de produção para a lâmina total de água dentro dos níveis de nitrogênio 300 e 600 $kg\ ha^{-1}$ de N aplicado ao solo, para a cultivar de palma forrageira Orelha aos 12 meses após o plantio, com seus coeficientes algébricos substituídos por numéricos.

$$PMV (LI/NN_{300}) = -323511 + 1761,9.LI - 1,2307.LI^2 \quad (14)$$

$$PMV (LI/NN_{600}) = -525608 + 1548.LI \quad (15)$$

Na Figura 1, são apresentadas às equações de regressão polinomial ($p < 0,01$) em que o rendimento (Y) é expresso em função da lâmina total de água (irrigação + precipitação efetiva). De acordo com o modelo, o menor rendimento em termos de produtividade de massa verde da cultivar de palma forrageira Orelha, em função das diferentes lâminas de irrigação dentro do nível de 300 $kg\ ha^{-1}$ de N aplicado ao solo se estabeleceu com a aplicação da lâmina L_1 (481,9 mm), correspondendo a 239.764,09 $kg\ ha^{-1}$, aumentando-se com o acréscimo da lâmina total até um valor máximo (L_m de 715,81 mm), próximo a L_4 , decrescendo em seguida até a aplicação de L_5 (778,7 mm) com valor de PVM de 302.216,43 $kg\ ha^{-1}$.

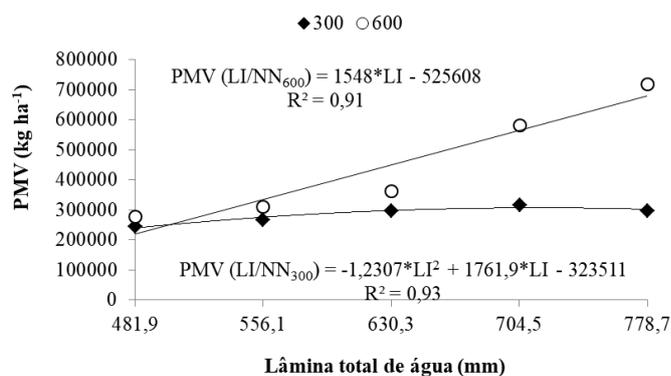


Figura 1. Produtividade da cultivar de palma forrageira Orelha (kg ha^{-1}) em função da lâmina total de água (irrigação + precipitação efetiva) dentro dos níveis de nitrogênio de 300 e 600 kg ha^{-1} .

É possível observar que, houve uma pequena diferença entre a lâmina de água que maximiza a produção e a lâmina posteriormente maior (L_5), correspondendo a 62,89 mm o que refletiu em uma redução de 4.867,27 kg ha^{-1} de PMV (Figura 1), ou seja, ao aumentar a lâmina de água reduziu a produtividade. No entanto, em termos econômicos essa pequena redução em lâmina de água quando se comparou a lâmina que maximizou com a maior utilizada na pesquisa, gera uma economia no consumo de água e energia, além disso, tem-se maior produtividade refletindo em ganhos econômicos.

A lâmina de água que maximizou a produção foi inferior a maior lâmina de água utilizada no estudo, isso se reflete em baixo consumo hídrico pela palma forrageira. De acordo com Taiz & Zaiger (2013), este fato se dá em função da planta ser uma espécie CAM, na qual cerca de 50 moléculas de água são perdidas para cada molécula de CO_2 fixada pela fotossíntese, o que resulta em uma razão de transpiração de 50.

Segundo Payero et al. (2013), estes dados de eficiência em consumo hídrico são fundamentais para a elaboração de um planejamento agrícola, visando o aumento nos ganhos financeiros e a redução dos custos acerca do consumo hídrico e energético.

Para a produtividade de massa verde da cultivar Orelha nas diferentes lâminas de água dentro do nível de 600 kg ha^{-1} de nitrogênio, observou-se resposta linear, assim, verifica-se que a lâmina que maximiza a produção foi a maior lâmina utilizada, correspondendo a 778,7 mm que gerou uma produtividade de massa verde máxima de 679.819,6 kg ha^{-1} (Figura 1).

Silva et al. (2020) afirmam que, irrigar adequadamente a palma forrageira é maximizar a produtividade, de forma a não causar danos ao meio ambiente, ou seja, utilizando racionalmente a água e os demais insumos, reduzindo custos, de forma a propiciar condições ideais de umidade para o adequado desenvolvimento da cultura.

A função de produção da palma forrageira cultivar Baiana para o fator lâmina total de água dentro dos níveis de nitrogênio de 150, 300 e 450 kg ha⁻¹ aos 12 meses após o plantio, para as equações polinomiais 16, 17 e 18, encontram-se na Figura 2.

$$PMV (LI/NN_{150}) = -951472 + 3278,7.LI - 2,3038.LI^2 \quad (16)$$

$$PMV (LI/NN_{300}) = -127152 + 523,21.LI \quad (17)$$

$$PMV (LI/NN_{450}) = -129168 + 550,03.LI \quad (18)$$

Com base no modelo matemático obtido para cultivar baiana em função da lâmina total dentro do nível de nitrogênio de 150 kg ha⁻¹, a lâmina de água que maximizou a produção foi de 711,58 mm, gerando produtividade de massa verde de 215.065,21 kg ha⁻¹ (Figura 2). Na lâmina mínima 481,9 mm obteve-se uma PMV de 93.527,56 kg ha⁻¹. Já a L₅ (778,7 mm), lâmina maior a que maximiza a produção, a produtividade de massa verde chegou a 204.687,98 kg ha⁻¹ (Figura 2).

A redução em termos de produtividade quando se comparou a lâmina que maximizou a produção com a maior lâmina de água utilizada no experimento foi de 10.377,31 kg ha⁻¹.

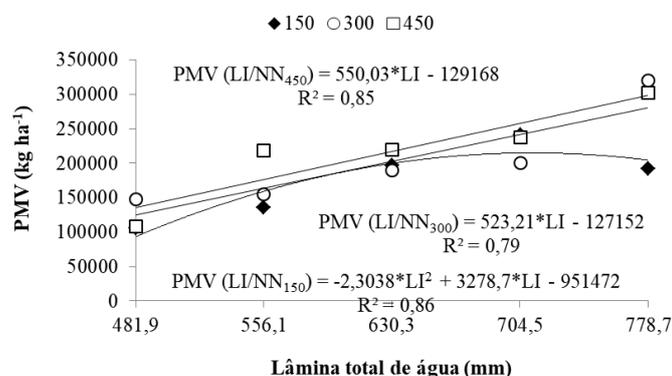


Figura 2. Produtividade da cultivar de palma forrageira Baiana (kg ha⁻¹) em função da lâmina total de água (irrigação + precipitação efetiva) dentro dos níveis de nitrogênio de 150, 300 e 450 kg ha⁻¹.

Assim, o manejo adequado da irrigação é fundamental para que se conheça a lâmina que maximiza a produção, uma vez que, essa lâmina pode ser inferior a utilizada como irrigação em muitas espécies. O manejo racional da irrigação pressupõe o uso criterioso do recurso hídrico disponível, para maximizar a produtividade das culturas com o uso eficiente da água, da energia, dos fertilizantes e de outros insumos empregados na produção, considerando os aspectos sociais e ecológicos da região (FRIZZONE, 2007).

A função de produção encontra-se representada graficamente na Figura 2. A máxima produtividade da cultivar Baiana foi de 280.428,6 kg ha⁻¹ através da lâmina total de água de 778,7 mm e uma dose de nitrogênio de 300 kg ha⁻¹. Já para o nível de nitrogênio de 450 kg ha⁻¹, a máxima produtividade obtida para a lâmina total aplicada de 778,7 mm foi de 299.305,4. Visualiza-se um efeito altamente significativo do fator lâminas totais de água sobre o rendimento da cultura da palma forrageira, o mesmo não ocorre com o fator níveis de nitrogênio, indicando dessa forma, que o fator lâminas totais de água foi mais limitante no rendimento da cultura que o fator níveis de nitrogênio.

A análise econômica para a palma forrageira cultivares Orelha e Baiana tendo a água como fator limitante para os níveis de nitrogênio 150, 300, 450 e 600 kg ha⁻¹, encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3. Lâmina total de água que maximizam a produtividade (LIm), produtividade de massa verde máxima (PMVm), custo parcial (C₀), custo total (C_T) receita líquida (R_L), valor presente líquido (VPL), taxa interna de retorno (TIR) e razão benefício custo (RBC).

Tratamento	LIm (mm)	PMVm (kg ha ⁻¹)	C ₀ (R\$ ha ⁻¹)	C _T (R\$ ha ⁻¹)	R _L (R\$ ha ⁻¹)	R _L (R\$ m ⁻³)	VPL (R\$ ha ⁻¹)	TIR (%)	RB C
Orelha NN ₃₀₀	715,8	307083,7	14639,8	18125,9	12582,5	1,76	63958,0	159,8	4,5
Orelha NN ₆₀₀	779,0	680284,0	14879,3	18673,1	49355,3	6,34	163167,7	360,6	9,7
Baiana NN ₁₅₀	711,6	215065,2	14726,2	18191,6	3314,9	0,47	39295,6	104,4	3,2
Baiana NN ₃₀₀	779,0	280428,6	14836,3	18630,0	9412,9	1,21	56328,9	139,6	4,0
Baiana NN ₄₅₀	779,0	299305,4	14803,1	18596,8	11333,7	1,45	61407,9	150,7	4,3

O preço de venda da massa verde da palma forrageira (Py) foi considerado de 0,10 R\$ kg⁻¹ ou 100,0 R\$ t⁻¹, conforme preços praticados por produtores da região para as três cultivares estudadas. Este valor de venda da palma forrageira também está de acordo com os relatados por Dantas et al. (2017). A partir da lâmina de irrigação, do tempo de irrigação e do custo da energia elétrica de 0,15 R\$ kW h⁻¹ se determinou o custo de uma unidade do insumo água (C_w) de 0,077 R\$ mm⁻¹ ha⁻¹ e o custo de uma unidade do insumo nitrogênio (C_N) de 1,80 R\$ kg⁻¹ ha⁻¹. As determinações desses custos foram relevantes para a análise econômica da viabilidade do cultivo de palma forrageira irrigada e adubada no semiárido brasileiro.

A diferença do custo parcial (C_0) entre a LIm de 715,8 mm (NN₃₀₀) e 779,0 mm (NN₆₀₀) é de 239,5 R\$ ha⁻¹ na cultivar Orelha, enquanto que para a Baiana a diferença é de 33,2 R\$ ha⁻¹ entre a LIm de 779,0 mm (NN₃₀₀) e 779,0 mm (NN₄₅₀), demonstrando um pequeno acréscimo nos custos de produção, que pode ser justificado pelos custos relativos à colheita que variam de acordo com cada tratamento, ou seja, nos tratamentos com maior produtividade de massa verde máxima requerem mais mão de obra para colheita.

Para o custo total (C_T) a diferença entre os tratamentos 715,8 mm (NN₃₀₀) e 779,0 mm (NN₆₀₀) é de 547,2 R\$ ha⁻¹ na cultivar Orelha, para a Baiana o custo total foi menor no tratamento 779,0 mm (NN₄₅₀) quando comparado ao 779,0 mm (NN₃₀₀), o que possivelmente foi influenciado pelos custos com a colheita e os demais insumos água e nitrogênio.

Dantas et al. (2017) relataram custo anual de produção da palma forrageira irrigada de 7.447,80 R\$ ha⁻¹ para o semiárido potiguar, sendo esse resultado relacionado aos maiores volumes de lâminas de irrigação aplicados, aumentando o custo variável relacionado à irrigação. Kirchner et al. (2019) obtiveram um custo total de R\$ ha⁻¹ 2.351,9 para a safra 2015/2016 e de R\$ ha⁻¹ 2.444,5 para a safra 2016/2017 ao avaliarem indicadores de viabilidade econômica de produção irrigada de sorgo forrageiro para bovinocultura de corte.

Os resultados são bem inferiores aos obtidos no presente estudo, em decorrência de Dantas et al. (2017) e Kirchner et al. (2019) não terem os custos com adubação nitrogenada em seus gastos, os valores de venda do produto serem diferentes e produtividade também ser inferior a obtida neste trabalho.

A cultivar Orelha proporcionou a maior receita líquida (R_L) quando irrigada com lâmina total de água que maximiza a produtividade de 779,0 mm associada a 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio, o que resultou em uma receita líquida de 49.355,3 R\$ ha⁻¹, equivalente a 6,34 R\$ m⁻³ de água utilizada na irrigação, enquanto que, a maior R_L para a Baiana foi obtida na LIm de 779,0 mm com 450 kg ha⁻¹ de N, com receita líquida de 11.333,7 R\$ ha⁻¹ ou 1,45 R\$ m⁻³ de água empregada na irrigação da cultura.

Morais (2016) informa em seu estudo que a cultivar de palma forrageira Orelha de Elefante Mexicana teve sua receita líquida influenciada pelo destino final do produto, ou seja, se a palma foi destinada para forragem obteve receita líquida média de R\$ 607,8, indicando não viabilidade econômica para 18 meses de cultivo. Já quando se considerou os cladódios como sementes, o valor médio de receita líquida passou para R\$ 32.858,28. Estes resultados são inferiores aos obtidos no presente estudo, o que possivelmente, pode ser pela menor produtividade de massa verde de palma forrageira obtida no estudo destes autores.

Neste caso, o empreendimento com palma forrageira nas condições deste estudo é considerado viável, uma vez que, o produtor tem um lucro acima do mínimo estabelecido de 10% para investimento inicial.

Frizzone (2007) relata que, quando o fator limitante para a produção é a água, esse recurso deve ser utilizado de forma objetiva para maximizar a receita líquida por unidade de volume de água utilizada, corroborando com esse estudo, uma vez que, as lâminas de água aplicadas maximizaram a receita líquida.

Os valores presentes líquidos obtidos em cada um dos tratamentos apresentaram VPL em que as entradas de caixa são maiores que os valores presentes das saídas de caixa, significando que a implantação de um projeto de palma forrageira cultivares Orelha e Baiana proporcionaram valores excedentes da ordem de Orelha NN₃₀₀ R\$ 63.958,0; Orelha NN₆₀₀ R\$ 163.167,7; Baiana NN₁₅₀ R\$ 39.295,6; Baiana NN₃₀₀ R\$ 56.328,9 e Baiana NN₄₅₀ 61.407,9, respectivamente, sob as condições apresentadas (Tabela 3). Sendo assim, capaz de recuperar todos os investimentos realizados e remunerar com uma taxa de atratividade mínima de 6% ao ano.

Dantas et al. (2017) ao estudar a viabilidade econômica da produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido Potiguar, obtiveram um valor presente líquido de R\$ 81.142,89, isto para o pior cenário considerando a compra das raquetes (R\$ 0,65 por unidade), elevando o custo de implantação para R\$ 50.347,80, o projeto ainda apresenta elevada viabilidade. Este resultado confirma os obtidos no presente estudo, onde ambos os trabalhos se apresentam como viáveis e lucrativos para estas condições de cultivo.

De acordo com Dantas et al. (2017), quando o valor presente líquido é superior a zero, significa dizer que o investimento é economicamente atrativo, ou seja, é viável. O valor presente líquido é um índice que evidencia o valor presente equivalente ao fluxo de receitas líquidas de cada investimento, ou seja, é definido como a diferença entre a soma atualizada de todos os benefícios em relação aos custos e inversões atualizados (fluxo líquido de caixa) a uma adequada taxa de desconto, a qual deve corresponder ao custo de oportunidade do capital.

Na avaliação da taxa interna de retorno (TIR), os resultados apontaram valores superiores a 100% e com aumento conforme a produtividade de massa verde máxima da palma forrageira, sendo que a cultivar Orelha na Lâmina total de água que maximiza a produtividade (LIm = 778,7 mm) com o nível de nitrogênio de 600 kg ha⁻¹ foi a que evidenciou maior TIR, correspondendo a 360,6% (Tabela 3). Almeida et al. (2018)

encontraram TIR de 131% para sistema de plantio convencional e de 162% para sistema de plantio direto, ambos irrigados, para um universo de 30 anos.

A taxa interna de retorno é um dos métodos para avaliar propostas de investimentos. É uma medida relativa, expressa em percentual, que demonstra o quanto rende um projeto de investimento, considerando a mesma periodicidade dos fluxos de caixa. Representa a taxa que iguala, num único momento, os fluxos de entradas com os de saídas de caixa. Em outras palavras, é a taxa que produz um VPL igual a zero (PEREIRA & ALMEIDA, 2008).

A taxa interna de retorno (TIR) é a taxa de desconto que tem por finalidade igualar os fluxos de entradas com os de saídas de um investimento, procurando determinar uma única taxa de retorno que depende exclusivamente dos fluxos de caixa do investimento, que resume os interesses de um projeto.

Analisando a razão benefício/custo (RBC) foi possível verificar que os benefícios são maiores do que os custos. Observa-se para a Orelha que esta razão foi maior para a LIm de 779,0 mm e adubada com 600 kg ha⁻¹ de N, já para a cultivar Baiana a maior RBC ocorreu no tratamento LIm de 779,0 mm e fertilizado com 450 kg ha⁻¹ de N (Tabela 3). Desta forma, esta análise possibilitou conhecer os benefícios dos investimentos realizados em cada tratamento aplicado na produção de palma forrageira.

Morais (2016), obteve uma relação custo benefício para Orelha de Elefante destinada a forragem de R\$ 0,08, no entanto, quando destinou a palma para semente, essa relação foi de R\$ 4,15. Estes valores são próximos aos obtidos neste estudo, indicando a viabilidade econômica desse empreendimento, pois, para cada R\$ 1,0 de investimento no sistema de produção há um retorno superior a R\$ 4,00, no caso da cultivar Orelha irrigada com a lâmina de 779,0 mm e nível de nitrogênio de 600 kg ha⁻¹, esse retorno foi de R\$ 9,7 por cada R\$ 1,0 investido.

É relevante destacar ainda que, o sistema de irrigação por gotejamento tem uma vida útil média de 8 anos, assim, para um possível segundo ciclo de cultivo os custos totais de produção serão compostos apenas pelos custos variáveis, desta forma, tem-se uma redução nos gastos e aumento da receita líquida e, conseqüentemente, a relação custo benefício (FRIZZONE & ANDRADE JUNIOR, 2005).

Arêdes & Pereira (2008) afirmam que, o estudo da análise econômica na fase de planejamento e implantação de sistemas de irrigação, é fundamental já que a irrigação se trata de uma tecnologia que requer significativos investimentos.

A receita líquida (R_L) para diferentes cenários de preços para a venda da massa verde de palma forrageira (P_y) em R\$ kg⁻¹ encontra-se na Figura 3.

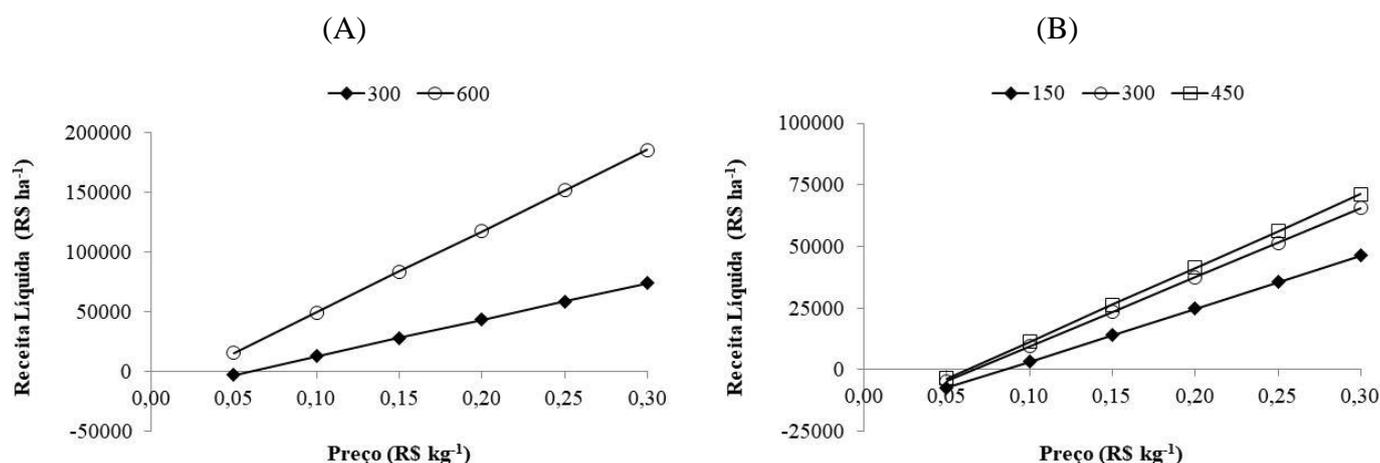


Figura 3. Receita líquida (R\$ ha⁻¹) da palma forrageira Orelha (A) e Baiana (B) em função da lâmina total de água que maximiza a produtividade, dos níveis de nitrogênio e de diferentes cenários de preços para a venda da massa verde.

Conforme os resultados da Figura 3, a cultivar Orelha fertilizada com 600 kg ha⁻¹ de N pode ser comercializada a 0,05 R\$ kg⁻¹, proporcionando uma receita líquida de 15.341,1 R\$ ha⁻¹, enquanto que, nos demais níveis de nitrogênio a venda da massa verde de palma forrageira a 0,05 R\$ ha⁻¹ resulta em R_L negativa e, com isso, prejuízo para o produtor rural. A venda da massa verde de palma forrageira a partir de 0,10 R\$ ha⁻¹ torna-se viável em todos os tratamentos analisados.

O maior nível de nitrogênio aplicado, na cultivar Orelha (600 kg ha⁻¹) proporcionou R_L de 49.355,3; 83.369,5; 117.383,7; 151.397,9 e 185.412,1 R\$ ha⁻¹, na cultivar Baiana (450 kg ha⁻¹) resultou em R_L de 11.333,7; 26.299,0; 41.264,3; 56.229,5 e 71.194,8 R\$ ha⁻¹, respectivamente, para os preços de venda a 0,10; 0,15; 0,20; 0,25 e 0,30 R\$ ha⁻¹. Portanto, a R_L além da produtividade depende do preço de venda da massa verde, sendo que o preço oscila conforme a oferta e demanda por palma forrageira na região.

Dantas et al. (2017) relatam que, o empreendimento torna-se inviável no cenário em que a venda é realizada por um preço menor que 0,05 R\$ kg⁻¹, sendo que o investidor possui uma grande margem de venda da palma forrageira. Os resultados destes autores não corroboram com o presente estudo, visto que, nesta pesquisa o preço de venda a 0,05 R\$ ha⁻¹ culmina em prejuízo para o produtor de palma forrageira.

Enquanto que, Moraes (2016) descrevem que o projeto é viável quando a massa verde é vendida por um preço superior a 0,115 R\$ kg⁻¹ (Orelha); 0,155 R\$ kg⁻¹ (Baiana) e 0,180 R\$ kg⁻¹ (Miúda), indo de acordo com essa pesquisa, pois o preço de venda a 0,10 R\$ kg⁻¹ resulta em lucro para o produtor de palma forrageira.

5.5. CONCLUSÕES

A produção de palma forrageira irrigada e adubada no semiárido é uma atividade promissora e economicamente viável.

De acordo com as premissas definidas, as ferramentas utilizadas para a definição da viabilidade do cultivo de palma forrageira, possibilitam a verificação da viabilidade do investimento, pois apresentam Valor Presente Líquido e Taxa Interna de Retorno positivas.

A lâmina total de água que maximiza a produtividade de 779,0 mm associada a maior dose de nitrogênio proporcionou a maior produtividade de massa verde máxima, obtendo-se maior receita líquida e também melhor razão benefício custo na cultivar Orelha de Elefante.

Recomenda-se o cultivo da palma forrageira Orelha de Elefante irrigada com lâmina de 779,0 mm e adubada com 600,0 kg ha⁻¹ de nitrogênio.

5.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alencar, C. A. B.; Cóser, A. C.; Martins, C. E.; Oliveira, R. A.; Cecon, P. R.; Leal, B. G. Doses de nitrogênio e estações do ano afetando a composição bromatológica e digestibilidade de capins cultivados sob pastejo. **Revista Ceres**, v.56, n.5, p. 640-647, 2009.
- Algozin, K. A.; Bralts, V. F.; Ritchie, J. T. Irrigation strategy selection based on crop yield, water, and energy use relationships: A Michigan example. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.43, n.5, p.428-431, 1988.
- Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- Almeida, V.; Alves Júnior, J.; Mesquita, M.; Evangelista, A. W. P.; Casaroli, D.; Battisti, R. Comparação da viabilidade econômica da agricultura irrigada por pivô central em sistemas de plantios convencional e direto com soja, milho e tomate industrial. **Global Science and Technology**, v. 11, n. 02, p. 256-273, 2018.
- Arêdes, A. F.; Pereira, M. W. G. Análise econômica da produção de café arábica: um estudo de caso com simulações de monte carlo para sistemas de baixa e alta produtividade. **Revista informações Econômicas**, v.38, n.4, p. 19-30, 2008.
- Bajgain, R.; Kawasaki, Y.; Akamatsu, Y.; Tanaka, Y.; Kawamura, H.; Keisuke Katsura; Shiraiwa, T. Biomass production and yield of soybean grown under converted paddy fields with excess water during the early growth stage. **Field Crops Research**, v.180, p.221-227, 2015.

- Barros, J.L.; Donato, S. L. R.; Gomes, V. M.; Donato, P.E.R.; Silva, J. A.; Padilha Júnior, M.C. palma forrageira „gigante“ cultivada com adubação orgânica. **Revista Agrotecnologia**, v.7, p.53-65, 2016.
- Cândido, M.J.D., Gomes, G.M.F., Lopes, M.N. & Ximenes, L.J.F. Cultivo de palma forrageira para mitigar a escassez de forragem em regiões semiáridas. **Informe Rural Etene**, n.7, v.3, p. 1-7. 2013.
- Consoli, S.; Inglese, G.; Inglese, P. Determination of evapotranspiration and annual biomass productivity of a cactus pear (*Opuntia ficus-indica* L. (Mill.) orchard in a Semi-arid Environment. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 139, n. 8, p. 680-690, 2013.
- Dantas, S. F A.; Lima, G. F. C.; Mota, E. P. Viabilidade econômica da produção de palma forrageira irrigada e adensada no semiárido Potiguar. **Revista iPecege**, v.3, n.1, p.59-74, 2017.
- Dias Filho, M. B. Os desafios da produção animal em pastagens na fronteira agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 40, (supl. especial), p. 243-252, 2011.
- Dubeux Júnior, J. C. B., Araújo Filho, J. T., Santos, M. V. F., Lira, M. A., Santos, D. C., Pessoa, R. A. S. Adubação mineral no crescimento e composição mineral da palma forrageira – Clone IPA-20. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. v.5, n.1,p. 129-135, 2010.
- Ferreira, D.F. Sisvar: A guide for its bootstrap procedures in multiple comparisons. **Ciência e Agrotecnologia**, v.38, n.2, p.109-112, 2014.
- Frizzone, J. A. **Funções de resposta das culturas à irrigação**. Piracicaba: ESALQUSP, 1993, 42p. v.6 (Série didática).
- Frizzone, J. A. Planejamento da Irrigação com Uso de Técnicas de Otimização. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.1, n.1, p.24-49, 2007.
- Frizzone, J. A.; Andrade Júnior, A. S. **Planejamento de irrigação: análise de decisão de investimento**. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica; Teresina: Embrapa Meio Norte, 2005. 627 p.
- Frizzone, J. A; Teodoro, R. E. E; Pereira, A. S.; Botrel, T. A. Lâminas de água e doses de nitrogênio na produção de aveia (*avena sativa* L.) Para forragem. **Revista Scientia Agricola**. v.53, n.3, p.578-586, 1995.
- Kirchner, J. H.; Robaina, A. D.; Peiter, M. X.; Torres, R. R.; Wellington Mezzomo, W.; Pimenta, B. D. Viabilidade financeira da irrigação em sorgo forrageiro em sistema de aspersão para bovinocultura de corte. **Irriga**, v. 24, n. 1, p. 143-161, 2019.

- Lima, A. S.; Silva, P. F.; Matos, R. M.; Bonou, S. I.; J Dantas Neto, J. Determinação da área de cladódios e fator de correção da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.14, nº.1, p. 3803 – 3815, 2020.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 3. ed atual e ampliado. 2012. 355p.
- Morais, J. E. F. **Evapotranspiração real efetiva e indicadores agrometeorológicos e econômicos da palma forrageira irrigada**. 2016. 81f (dissertação de mestrado) Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Serra Talhada, 2016.
- Payero, j. O.; irmak, s.; Daily energy fluxes, evapotranspiration and crop coeficiente of soybean. **Agricultural Water Management**, v.129, p.31– 43, 2013.
- Pereira, W. A. Almeida, L.S. Método Manual para Cálculo da Taxa Interna de Retorno. **Revista Objetiva**, v.5, n2,p. 38 - 50. 2008.
- Queiroz, M. G. Q.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Carlos Souza, A. A.; Carvalho, H. F. S. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. **Irriga, Botucatu**, Edição Especial, Irrigação, p. 141-154, 2016.
- Queiroz, M. G.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Lima, L. R.; Alves, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 10, p. 931-938, 2015.
- Ramírez-Tobias, H.M.; Aguirre-Rivera, J.R. e Pinos-Rodriguez, J.M. Productivity of *Opuntia* ssp. and *Nopalea* sp. (Cactacea) growing under greenhouse hydroponics system. **J Food Agric Environ**, v.8, p. 660-665. 2010.
- Ramos, J. P. R.; Leite, M. L. M. V.; Oliveira Júnior, S.; Nascimento, J. P.; Santos, E. M. Crescimento vegetativo de *opuntia ficus-indica* em diferentes espaçamentos de plantio. **Revista Caatinga**, v. 24, n. 3, p. 41 - 48, 2011.
- Rocha, R.S.; Voltolini, T.V.; Gava, C.A.T. Características produtivas e estruturais de genótipos de palma forrageira irrigada em diferentes intervalos de corte. **Archivos de Zootecnia**. v.66, n.255, p. 365-373. 2017.
- Rodriguez, J. L. **Atlas Escolar Paraíba**. João Pessoa: Editora Grafset, 2002.
- Santos, D. C.; Farias, I.; Lira, M. A.; Santos, M. V. F.; Arruda, G. P.; Coelho, R. S. B.; Dias, F. M.; Melo, J. N. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).

- Silva, P. F. **Crescimento e produtividade de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada**. 2017. 66 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande - PB.
- Silva, P. F., Matos, R. M., Borges, V. E., Dantas Neto, J., Farias, M. S. S. Morphology and biomass yield of forage cactus under mineral fertilization in organic soil. **African J. of agric. Research**, v.11, 3497-3505, 2016.
- Silva, P. F.; Matos, R. M.; Dantas Neto, J.; Borges, V. E.; Galvão Sobrinho, Thiago; Bonou, S. I.; Azevedo, C. A. V.; Lima, V. L. A.; Melo Junior, A. P. Water and nitrogen water use efficiency in forage palm irrigated with salt water in the Neossolo. **Australian journal of crop science**, v.14, n.4, p.683-690. 2020.
- Silva, T.G.F.; Araújo Primo, J.T.; Morais, J.E.F.; Diniz, W.J.S.; Souza, C.A.A.; Silva, M.C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. **Revista Caatinga**, v. 28, p.10-18. 2015.
- Suassuna, P. **Lucratividade da Cultura da Palma Forrageira na Paraíba**. 1993. Disponível em:< www.joaosuassuna.hpg.ig.com.br/sistprod.htm - 5k ->. Acesso em 16 de outubro de 2017.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre:Artemed, 2013. 954p.
- Taiz, L.; Zeiger, E.; Moller, I.M.; Murphy, A. **Fisiologia e desenvolvimento vegetal**. 6. ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.
- Vasconcellos, M. A. S. **Fundamentos de economia**. 2 ed.São Paulo: Saraiva, 2007. 246p.

6.1. PEGADA HÍDRICA DA PALMA FORRAGEIRA SOB FERTIRRIGAÇÃO NITROGENADA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

RESUMO

A utilização da pegada hídrica é importante para estimar o consumo total de água e os impactos ambientais ocasionados durante o processo produtivo de uma determinada cultura agrícola. Desta forma, objetivou com esta pesquisa determinar a pegada hídrica verde, azul e cinza da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada no semiárido brasileiro. O experimento foi desenvolvido em condições de campo no município de Santa Luzia, estado da Paraíba, Brasil. O delineamento em blocos ao acaso e fatorial 5 x 5, constituído de cinco lâminas de irrigação (25; 50; 75; 100 e 125% da ET_0), cinco doses de adubação nitrogenada (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha⁻¹ de N) e três repetições. Esse delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante; Baiana e Miúda). Nesse experimento, se analisou a pegada hídrica verde, azul e cinza de forma individual para cada cultivar de palma forrageira estudada. O aumento na dose de nitrogênio aplicada reduziu a pegada hídrica verde, azul e cinza das cultivares de palma forrageira. O acréscimo na lâmina de irrigação diminuiu a pegada hídrica verde e cinza, e aumentou a azul. A cultivar Orelha de Elefante propiciou a menor pegada hídrica verde, azul e cinza. A pegada hídrica é um importante indicador, capaz de monitorar o impacto do consumo de água das culturas irrigadas e adubadas sobre o meio ambiente. A pegada hídrica das cultivares de palma forrageira irrigada e adubada é a menor encontrada na literatura, entre as plantas irrigadas, evidenciando o grande potencial dessa forrageira para regiões com pouca disponibilidade de água, como o semiárido brasileiro.

PALAVRAS-CHAVE: componentes verde, azul e cinza, *Opuntia* e *Nopalea*, consumo de água e fertilização.

WATER FOOTPRINT OF FORAGE PALM UNDER NITROGEN FERTIRRIGATION IN THE BRAZILIAN SEMIARID

ABSTRACT

The use of the water footprint is important to estimate the total water consumption and the environmental impacts caused during the production process of a given agricultural culture. Thus, this research aimed to determine the green, blue and gray water footprint of the forage palm under nitrogen fertigation in the Brazilian semiarid region. The experiment was carried out under field conditions in the municipality of Santa Luzia, state of Paraíba, Brazil. The randomized block design and factorial 5 x 5, consisting of five irrigation depths (25; 50; 75; 100 and 125% of ET_0), five doses of nitrogen fertilization (0; 150; 300; 450 and 600 kg ha⁻¹ of N) and three repetitions. This design was used for three forage palm cultivars (Elephant Ear; Baiana and Miúda). In this experiment, the green, blue and gray water footprint was analyzed individually for each studied forage palm cultivar. The increase in the applied nitrogen dose reduced the green, blue and gray water footprint of forage palm cultivars. The addition of the irrigation blade decreased the green and gray water footprint and increased the blue one. The cultivar Orelha de Elefante provided the smallest green, blue and gray water footprint. The water footprint is an important indicator, capable of monitoring the impact of water consumption of irrigated and fertilized crops on the environment. The water footprint of irrigated and fertilized forage palm cultivars is the lowest found in the literature, among irrigated plants, showing the great potential of this forage for regions with little water availability, such as the Brazilian semiarid.

KEY WORDS: green, blue and gray components, *Opuntia* and *Nopalea*, water consumption and fertilization.

6.2. INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a disponibilidade de água, diante do cenário cada vez mais frequente de escassez hídrica, favoreceu a introdução de um novo conceito que serve como indicador do consumo de água, com o intuito de combater ou mesmo reduzir os excessos provocados em sua utilização (MEKKONEN & HOEKSTRA, 2011; CHAPAGAIN & HOEKSTRA, 2011). Trata-se de um indicador multidimensional denominado de pegada hídrica, uma vez que, contabiliza o volume de água consumido na produção de bens e serviços, com base na quantidade utilizada em todas as etapas do processo de produção (HOEKSTRA & HUNG, 2002; GERBENS-LEENES et al., 2009; SILVA et al., 2013).

De acordo com Roux et al. (2016); Nyambo & Wakindiki (2015) e Rivas Ibáñez et al. (2017), a pegada hídrica seja ela verde, azul ou cinza tem como objetivo designar o consumo hídrico por unidade de biomassa produzida nos sistemas de produção vegetal.

Chapagain & Hoekstra (2008) afirmam que, a pegada hídrica é composta por três tipos de uso da água; a verde, que consiste no volume de águas pluviais armazenadas no perfil do solo e evapora dos campos de cultivo; a azul é a quantidade de água doce extraída dos rios e lagos que é utilizada nos cultivos, mas não recuperada e a cinza que é considerada indicador do grau de poluição da água doce de uma etapa do processo, podendo estar engajada na etapa do processo de produção de qualquer produto ou serviço (HOEKSTRA et al., 2011; SILVA et al., 2013; MATOS et al., 2017).

Diversos são os aspectos que podem influenciar a pegada hídrica na produção vegetal, dentre os quais podem ser destacados: o clima da região; o tipo de cultura utilizada, caso se adapte as condições regionais; o manejo utilizado na condução da cultura (densidade de plantio, adubação, irrigação, dentre outros) (CARVALHO & MENEZES, 2014).

Assim, sendo o cultivo de forrageira, em especial a palma forrageira por ser uma cactácea que possui boa adaptação às regiões áridas e semiáridas, apresentando tolerância a períodos longos de estiagem e alta eficiência no uso de água. Sendo assim, se constituiu como um dos principais recursos forrageiros para manutenção da pecuária brasileira (SALES et al., 2013; PINHEIRO et al., 2014).

Silva et al. (2015) relataram que, se faz necessário o estudo do manejo adequado da cultura no tocante a densidade de plantio, adubação e sistema de irrigação a ser adotado, pois são fatores que influenciam na quantidade de água a ser fornecida a cultura para seu pleno desenvolvimento.

Nesse sentido, a determinação das pegadas hídrica é essencial visando à redução do consumo de água, da poluição causada pelo uso de agroquímicos, sejam eles fertilizantes

nitrogenados ou mesmo defensivos utilizados no controle da cochonilha da escama, que pode conduzir grandes perdas na produção da palma forrageira (DUBEUX JÚNIOR et al., 2013; RIVAS IBÁÑEZ et al., 2017).

Dada à relevância da temática, objetiva-se determinar a pegada hídrica verde, azul e cinza da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada no semiárido brasileiro.

6.3. MATERIAL E MÉTODOS

6.3.1. Descrição do local da pesquisa

O experimento foi desenvolvido em condições de campo, no período correspondente a maio de 2015 e junho de 2016, na fazenda Poço Redondo, município de Santa Luzia, localizado na microrregião do Seridó ocidental paraibano, latitude 06° 52' 27", longitude 36° 56' 00" WGr, e altitude média 299 m. A região está situada na Mesorregião da Borborema, sendo o clima local do tipo Bsh-Tropical, quente e seco, semiárido com chuvas de verão.

No Seridó ocidental a principal característica climática não é a ausência de chuvas, mas sua irregularidade (RODRIGUES, 2002). Segundo Silva (2017), a região possui precipitação média anual de 500,0 mm, com maior concentração nos meses de janeiro a maio. A temperatura média anual de 27,6 °C, com máxima de 33,0 °C e mínima de 22,3 °C, e umidade relativa do ar oscilando entre 50 a 70%.

O solo da área experimental possui textura franco-arenosa, sendo classificado como do tipo Neossolos Flúvicos, apresentando como característica principal ser derivados de sedimentos aluviais, conforme metodologia da EMBRAPA (2014).

6.3.2. Delineamento experimental e sistema de plantio

O delineamento experimental foi em blocos ao acaso e esquema fatorial 5 x 5, sendo o primeiro fator constituído de cinco lâminas de irrigação - LI (25; 50; 75; 100 e 125 da ET₀); e o segundo por cinco doses de nitrogênio - DN (0; 150; 300; 450 e 600 kg ha⁻¹ de N). Este delineamento foi utilizado para três cultivares de palma forrageira (Orelha de Elefante; Baiana e Miúda), com três repetições.

A escolha dessas cultivares baseou-se na capacidade de resistir a cochonilha do carmim (*Dactylopius Opuntiae*), por, atualmente, ser a principal praga da palma forrageira no semiárido brasileiro.

Cada parcela experimental se constituiu por uma fileira dupla de plantas, sendo espaçadas de 0,4 m entre linhas; 2,0 m entre fileiras duplas; 0,25 m entre plantas; 5,0 m de comprimento e 1,0 m de bordadura. A parcela com área de 14,4 m², sendo a área útil da

parcela de 0,6 m² e densidade de plantio para um hectare de 33.333 mil plantas. As parcelas referentes à lâmina de irrigação de 100% da ET₀ possuíam área equivalente ao dobro das demais.

As parcelas foram adubadas na fundação com fósforo e potássio conforme recomendações de Santos et al. (2006), e a análise do solo. A ureia foi utilizada como fonte de nitrogênio, sendo aplicada mensalmente, via fertirrigação, através de injetor de fertilizantes tipo Venturi. A adubação orgânica feita com esterco bovino aplicando 1,0 kg por metro linear, conforme recomendações de Santos et al. (2006).

O plantio das raquetes se deu em sulco com alinhamento bilateral (Dominó), onde foram utilizadas raquetes isentas de pragas e doenças, entre elas, a cochonilha-de-escamas (*Diaspis Echinocacti*). As raquetes passaram por período de cura à sombra, quando o cladódio perde parte da umidade, ocorrendo à cicatrização das lesões provocadas pela operação de corte no campo. Além disso, foram plantadas nos sulcos de frente para o sol e enterradas 50% com inclinação de 45° (SUASSUNA, 1993). As aplicações dos tratamentos se iniciaram com dois meses após o plantio das sementes no campo.

6.3.3. Sistema e manejo da irrigação

O sistema de irrigação realizado por gotejamento, com utilização de mangueira gotejadora com espessura da parede de 0,2 mm; diâmetro interno de 16,0 mm; espaçamento entre emissores de 0,20 m; pressão nominal de 7,0 m.c.a; vazão de 6,0 L h⁻¹ m⁻¹; com a seguinte equação do emissor: $q = 0,46 \times p^{0,5}$. A água aplicada através da irrigação para suprir as necessidades hídricas das plantas foi captada de um poço amazonas localizado a 80,0 m de distância da área experimental.

A lâmina de irrigação (LI) aplicada duas vezes por semana com base na evapotranspiração de referência, sendo a lâmina aplicada em cada tratamento determinada pela Equação 1.

$$LB = \left(\frac{ET_0 \cdot LAP}{Ea} \right) - P \quad (1)$$

Em que: LB - lâmina bruta a ser aplicada em cada tratamento (mm); ET₀ - evapotranspiração de referência (mm); LAP - fração da lâmina a ser aplicada em cada tratamento (decimal); P - precipitação ocorrida no período (mm); e Ea - eficiência de aplicação do sistema de irrigação (0,96).

O cálculo da intensidade de aplicação do sistema de irrigação feito de acordo com a metodologia proposta por Mantovani et al. (2012), que está expressa na Equação 2.

$$Ia = \frac{Ne.q}{A} \quad (2)$$

Em que: Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}); Ne - número de emissores por planta; q - vazão média dos emissores ($1,21 \text{ L h}^{-1}$); e A - área ocupada pela planta ($0,30 \text{ m}^2$).

A estimativa do tempo de irrigação necessário para aplicar a lâmina de irrigação em cada tratamento foi determinada de acordo com o método proposto por Mantovani et al. (2012), vide Equação 3.

$$Ti = \frac{LB}{Ia} \quad (3)$$

Em que: Ti - tempo de aplicação da irrigação (h); LB - lâmina de irrigação bruta (mm); e Ia - intensidade de aplicação do sistema de irrigação (mm h^{-1}).

6.3.4. Determinação da evapotranspiração de referência

A evapotranspiração de referência diária (ET_0), estimada seguindo a metodologia proposta por Penman-Monteith, também recomendada pela FAO (ALLEN et al., 1998), conforme expressa na Equação 4.

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (4)$$

Em que: ET_0 - evapotranspiração de referência diária (mm dia^{-1}); R_n - saldo diário da radiação ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); G - fluxo diário de calor no solo ($\text{MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$); T - temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); u_2 - velocidade média do vento a 2 m de altura (m s^{-1}); e_s - pressão de saturação do vapor d'água média (kPa); e_a - pressão de vapor média (kPa); Δ - declividade da curva de pressão de vapor no ponto de T ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$); e γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$).

6.3.5. Cálculo da pegada hídrica

6.3.5.1. Cálculo da evapotranspiração verde e azul

No cálculo da evapotranspiração verde foram considerados os valores mínimos da evapotranspiração total da cultura (ET_c) ou precipitação efetiva (P_{eff}) da área experimental (HOEKSTRA et al., 2011), conforme expressa a Equação 5.

$$ET_{verde} = \min(ET_c \text{ ou } P_{eff}) \quad (5)$$

A evapotranspiração azul da área de estudo foi estimada de forma similar da evapotranspiração verde, ou seja, o máximo da evapotranspiração total da cultura (ET_c) e a precipitação efetiva (P_{eff}), Equação 6, adaptada de Hoekstra et al. (2011).

$$ET_{azul} = \max(ET_c - P_{eff}) \quad (6)$$

A precipitação pluviométrica foi monitorada com um pluviômetro instalado na área experimental. A precipitação efetiva foi determinada utilizando a metodologia proposta pelo Serviço de Conservação do Solo do Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (SCS USDA). Silva et al. (2015) dizem que esta metodologia é considerada a mais utilizada e precisa.

6.3.5.2. Cálculo das necessidades hídricas verde e azul

A necessidade hídrica da cultura (NHC) da palma forrageira, quando cultivada em condições ótimas de crescimento, é igual à evapotranspiração total do ciclo da cultura (ET), sendo utilizado um fator 10 para converter milímetros em $m^3 \text{ ha}^{-1}$ e L é o número de dias do ciclo da palma forrageira (HOEKSTRA et al., 2011), conforme as Equações 7 e 8.

$$NHC_{verde} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{verde} \quad (7)$$

$$NHC_{azul} = 10 \sum_{d=1}^{d=L} ET_{azul} \quad (8)$$

6.3.5.3. Cálculo da pegada hídrica verde e azul

Para o cálculo da pegada hídrica verde e azul da cultura da palma forrageira, foram utilizadas as Equações 9 e 10, metodologia proposta por Hoekstra et al. (2011).

$$PH_{verde} = \frac{NHC_{verde}}{P} \quad (9)$$

$$PH_{azul} = \frac{NHC_{azul}}{P} \quad (10)$$

Em que: NHC_{verde} - necessidade hídrica verde da palma forrageira ($m^3 t^{-1}$); NHC_{azul} - necessidade hídrica azul da palma forrageira ($m^3 t^{-1}$); e P - produtividade da palma forrageira ($t ha^{-1}$).

6.3.5.4. Cálculo da pegada hídrica cinza

A partir dos agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira, foi realizado um levantamento das condições ambientais de solo, clima e manejo da cultura na área experimental.

Estimou-se a pegada hídrica cinza através da poluição difusa, pois quando uma substância química é aplicada no solo, apenas uma parte percola para águas superficiais e subterrâneas. Segundo Hoekstra et al. (2011), deve-se estimar a fração das substâncias químicas aplicadas que atingem os corpos hídricos através de modelos matemáticos.

Com base nos agrotóxicos (fungicida e inseticida) utilizados no cultivo da palma forrageira foram determinadas as concentrações máximas (C_{max}) permitidas dos poluentes através da legislação sobre os padrões de qualidade da água em seu estado natural. Utilizou-se a Resolução CONAMA nº 357/2005 para águas doces Classe II do Brasil (BRASIL, 2005) e as legislações da União Europeia (UE, 2013) e do INERIS (2013). Franke et al. (2013) indicam são normas atualizadas e cientificamente confiáveis.

Os agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira na área de estudo durante o período experimental encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1. Agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira.

Cultura	Agrotóxico	Classe	Classificação toxicológica	Classificação periculosidade ambiental
Palma Forrageira	Calda Bordalesa (<i>Sulfato de cobre</i>)	Fungicida	II Muito perigoso	Classe III Perigoso
	Assist (<i>Óleo Mineral</i>)	Inseticida / acaricida	IV Pouco Tóxico	Classe IV Pouco Perigoso

O tipo de solo da área experimental determinou a taxa de lixiviação-vazão dos agrotóxicos. Uma fração de lixiviação-vazão foi utilizada para demonstrar a quantidade de substâncias químicas aplicadas no solo, para estimativa da quantidade de substâncias que entram nas águas subterrâneas ou superficiais. A fração derivada a partir da metodologia de Franke et al. (2013) e calculada para cada agrotóxico utilizado no cultivo da palma forrageira.

A pegada hídrica cinza (PHC) foi calculada para cada agrotóxico separadamente. Já a estimativa realizada pela divisão da carga poluente (L, em massa/tempo) e pela diferença entre a concentração do padrão ambiental de qualidade da água para um determinado poluente (a concentração máxima aceitável $C_{m\acute{a}x}$, em massa/volume) e sua concentração natural no corpo d'água receptor (C_{nat} , em massa/volume). Para cada agrotóxico se utilizou a Equação 11, seguindo Franke et al. (2013).

$$PH_{cinza} = \frac{L}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} = \frac{\alpha \times Apl}{C_{m\acute{a}x} - C_{nat}} \quad (11)$$

O Apl representa a quantidade de substâncias químicas aplicadas no solo em um determinado processo (em massa/tempo). O fator adimensional α representa a fração de lixiviação ou escoamento, definido como a fração de substâncias químicas aplicadas que atingem os corpos d'água, calculada de acordo com a Equação 12.

$$\alpha = \alpha_{m\acute{i}n} + \left[\frac{\sum_i S_i \times W_i}{\sum_i W_i} \right] \times (\alpha_{m\acute{a}x} - \alpha_{m\acute{i}n}) \quad (12)$$

Em que: $\alpha_{m\acute{i}n}$ - fração de lixiviação/vazão mínima; $\alpha_{m\acute{a}x}$ - fração de lixiviação-vazão máxima; S_i - potencial de lixiviação-escoamento; W_i - peso do fator.

A pegada hídrica cinza para cada cultivar de palma forrageira foi estimada multiplicando-se a taxa de aplicação da substância pela fração de lixiviação, dividida pela concentração máxima aceitável, menos a concentração natural do poluente, e divididos pela produtividade da cultura, conforme expressa a Equação 13.

$$PH_{cinza} = \frac{(\alpha \times TQ) / (C_{m\acute{a}x} - C_{nat})}{P} \quad (13)$$

Em que: PH_{cinza} - pegada hídrica cinza da cultura ($m^3 \ t^{-1}$); α - fração de lixiviação; TQ - taxa de aplicação das substâncias químicas ($kg \ ha^{-1}$); $C_{m\acute{a}x}$ - concentração máxima admissível do poluente no meio aquático receptor ($kg \ m^{-3}$); C_{nat} - concentração natural do poluente considerado no meio aquático receptor ($kg \ m^{-3}$); P - produtividade da cultura ($t \ ha^{-1}$).

As pegadas hídricas verde, azul e cinza foram analisadas de forma individual para cada cultivar de palma forrageira estudada.

6.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

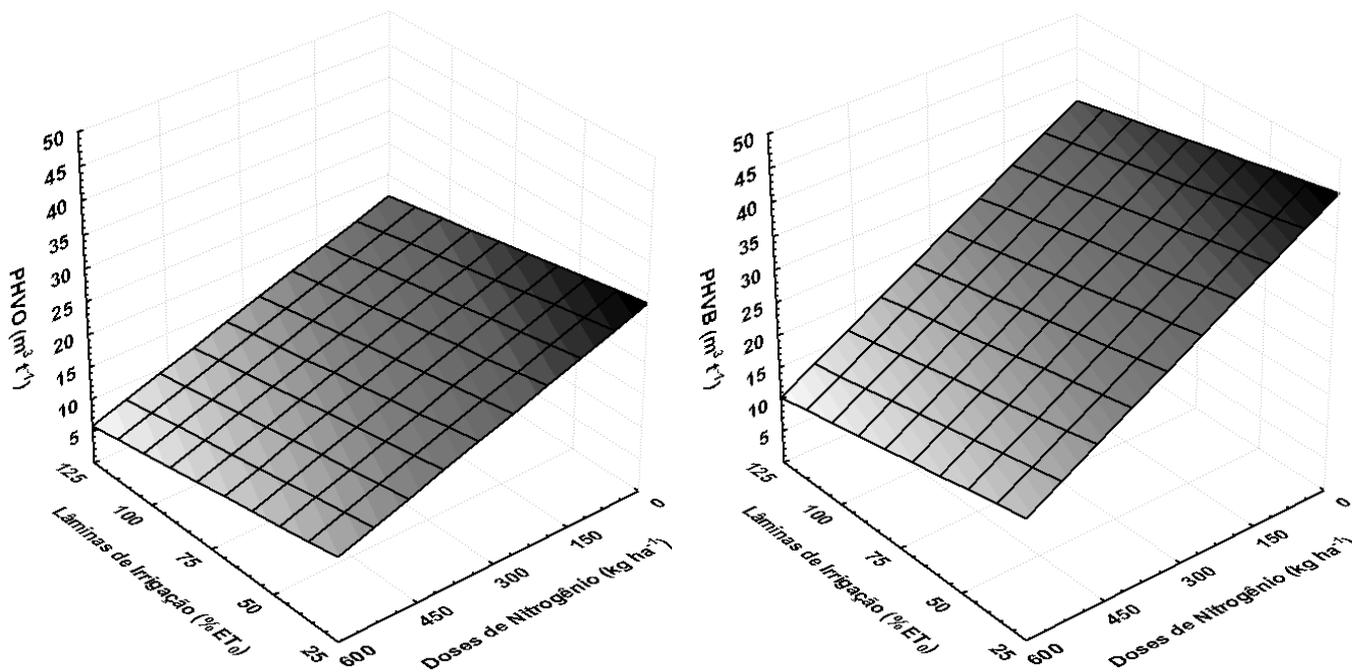
6.4.1. Precipitação efetiva e evapotranspiração

Durante o período experimental, a precipitação efetiva foi de 407,7 mm, o que equivale a necessidade hídrica verde da cultura, enquanto que a necessidade hídrica azul equivalente a evapotranspiração da cultura foi igual as lâminas aplicadas através da irrigação: 74,2; 148,4; 222,7; 296,9 e 371,1 mm, respectivamente, para 25, 50, 75, 100 e 125% da ET_0 .

Medeiros et al. (2015) relatam que, no município de Santa Luiza a distribuição da precipitação pluviométrica é irregular, onde os maiores índices pluviométricos ocorrem de dezembro a maio e os menores nos meses de junho a agosto, com precipitação média anual de 541,0 mm e evapotranspiração potencial anual de 1.230,2 mm, com oscilações de 102,8 a 125,6 mm $mês^{-1}$, com maiores taxas evapotranspiradas de outubro a abril.

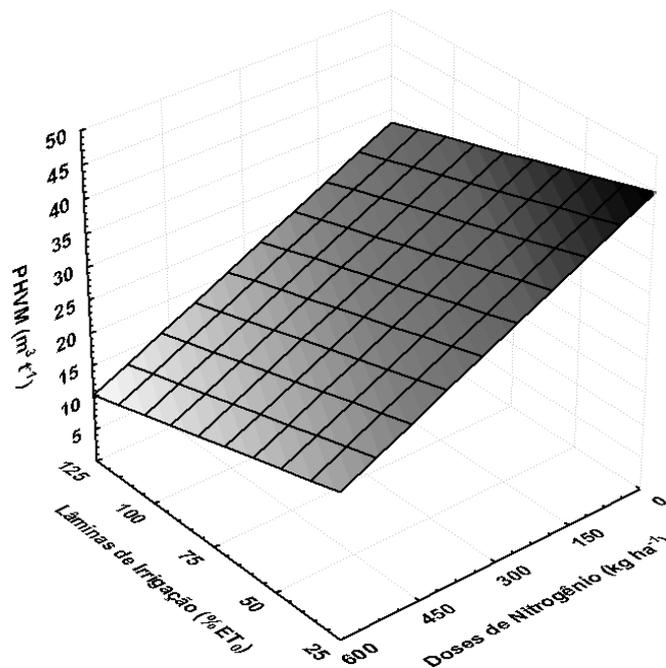
6.4.2. Pegada hídrica verde

Na Figura 1 está a pegada hídrica verde (PHV) para as três cultivares de palma forrageira estudada em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.



$$\begin{aligned} \text{PHVO (m}^3 \text{ t}^{-1}) &= \\ 30,6309 - 0,0265 * \text{DN} - 0,0718 * \text{LI} \\ R^2 &= 0,92 ** \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PHVB (m}^3 \text{ t}^{-1}) &= \\ 47,248 - 0,0443 * \text{DN} - 0,0833 * \text{LI} \\ R^2 &= 0,98 ** \end{aligned}$$



$$\text{PHVM (m}^3 \text{ t}^{-1}) = 47,7509 - 0,0376 * \text{DN} - 0,1187 * \text{LI}$$

$$R^2 = 0,90 **$$

Figura 1. Pegada hídrica verde para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHVO), Baiana (PHVB) e Miúda (PHVM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *; ** Significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente.

Os maiores valores obtidos de pegada hídrica verde foram de 28,8, 45,2 e 44,8 m³ t⁻¹, respectivamente, para as cultivares Orelha de Elefante, Baiana e Miúda, onde este máximo consumo de água verde (precipitação efetiva) foi observado nos tratamentos submetidos a lâmina de irrigação de 25% da ET₀ e dose de nitrogênio de 0 kg ha⁻¹.

As cultivares de palma forrageira proporcionaram menor PHV quando irrigadas com 125% da ET₀ e 600 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), com valores de 5,8, 10,3 e 10,4 m³ t⁻¹, respectivamente, para as cultivares Orelha de Elefante, Baiana e Miúda. Observa-se que, a cultivar Orelha de Elefante (gênero *Opuntia*) propiciou a menor pegada hídrica verde, enquanto que a Baiana e Miúda (gênero *Nopalea*) teve o maior consumo de água verde (PHV).

O decréscimo da PHV quando se elevou as lâminas de irrigação e as doses de nitrogênio, pode ser justificado pelo fato da maior produtividade das cultivares de palma forrageira com fertirrigação de 125% da ET₀ e 600 kg ha⁻¹ de N.

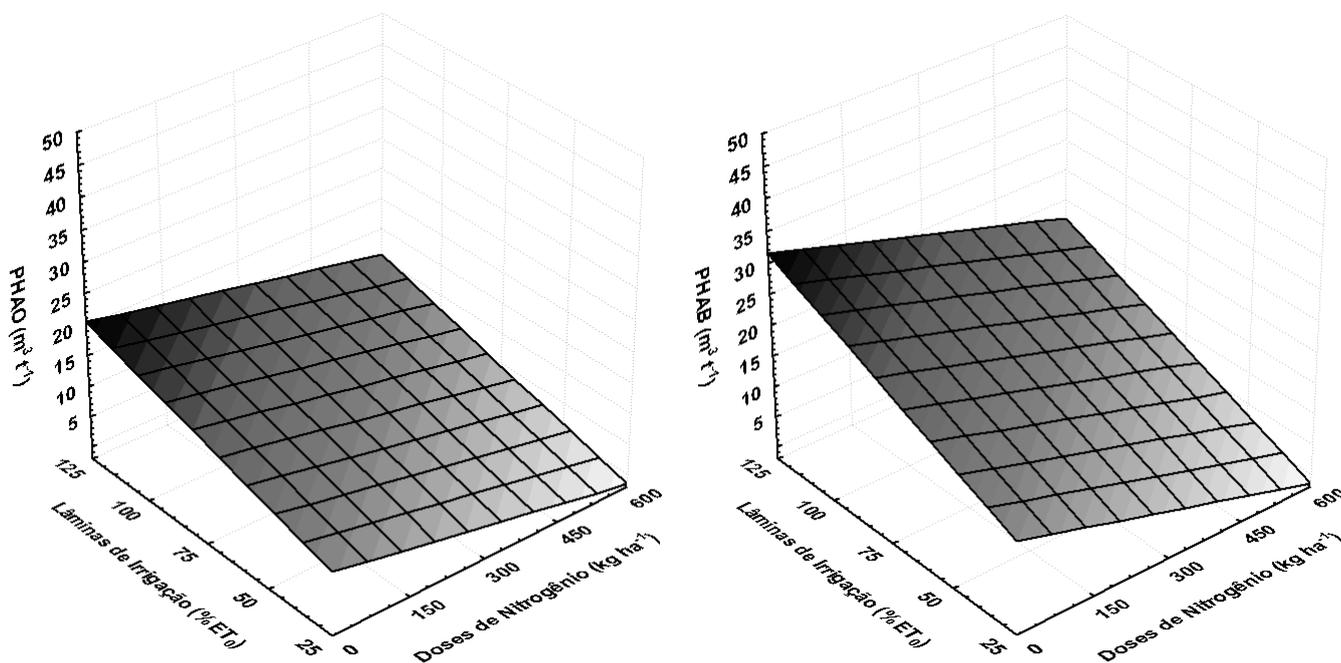
Silva et al. (2015) avaliando a pegada hídrica verde da cana-de-açúcar (metabolismo C4) cultivada no Estado da Paraíba, constataram médias de 56,9; 55,7; 51,1 e 50,2 m³ t⁻¹, respectivamente, para as lâminas de irrigação de 25, 50, 75 e 100% da evapotranspiração de referência (ET₀).

Carvalho & Menezes (2014) estudando a pegada hídrica do capim-buffel (metabolismo C4), observaram no tratamento testemunha (sem adubação) pegada hídrica de 1.527,0 m³ ton⁻¹, enquanto que, as plantas com adubo químico reduziram a PH para 1.168,0 m³ ton⁻¹, o que equivale a uma redução de 23,0% na pegada hídrica da cultura (EDVAN et al., 2010).

Os resultados verificados por estes autores são superiores aos observados no presente estudo, possivelmente, em função da palma forrageira ser uma planta com Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM). Segundo Taiz & Zeiger (2013), as plantas CAM ao abrirem os estômatos à noite reduzem a perda de água para o ambiente, ao mesmo tempo em que, permitem a entrada de CO₂. Este metabolismo permite a palma forrageira produzir biomassa verde utilizando um menor volume de água.

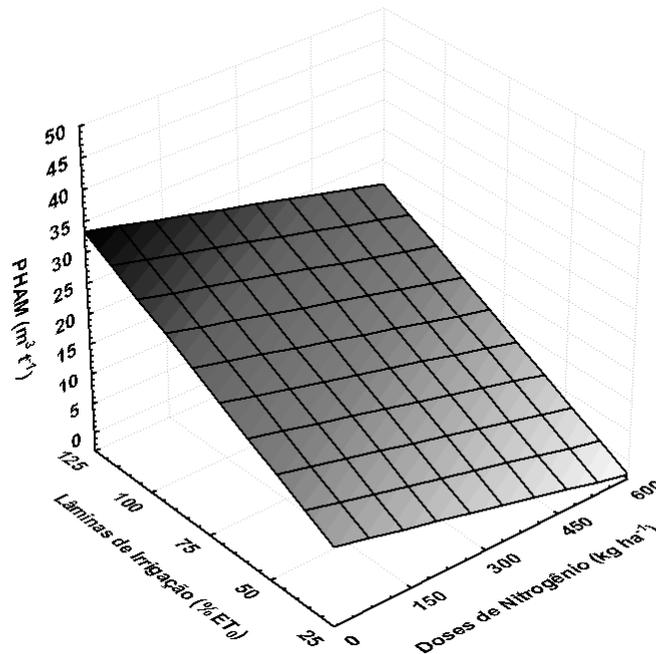
6.4.3. Pegada hídrica azul

Os resultados da pegada hídrica azul (PHA) para as três cultivares de palma forrageira em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio encontram-se na Figura 2.



$$\begin{aligned} \text{PHAO (m}^3 \text{ t}^{-1}\text{)} &= \\ 5,1687-0,0164*\text{DN}+0,1225*\text{LI} \\ R^2 &= 0,91 \text{ **} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{PHAB (m}^3 \text{ t}^{-1}\text{)} &= \\ 8,4344-0,0243*\text{DN}+0,1848*\text{LI} \\ R^2 &= 0,93 \text{ **} \end{aligned}$$



$$\text{PHAM (m}^3 \text{ t}^{-1}) = 4,3238 - 0,0208 * \text{DN} + 0,2327 * \text{LI}$$

$$R^2 = 0,94 *$$

Figura 2. Pegada hídrica azul para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHAO), Baiana (PHAB) e Miúda (PHAM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *; ** Significativo em nível de 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente.

A pegada hídrica azul das três cultivares de palma forrageira alcançaram os maiores índices na lâmina de irrigação de 125% da ET_0 e adubadas com 0 kg ha^{-1} de nitrogênio, com médias de $20,5$, $31,5$ e $33,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, respectivamente, para as cultivares Orelha de Elefante, Baiana e Miúda.

Verifica-se também que, o aumento do volume de água aplicado através da irrigação elevou o consumo de água azul (PHA), sendo a menor pegada hídrica azul a da lâmina de irrigação de 25% da ET_0 . O acréscimo nas doses de nitrogênio diminuiu o consumo de água azul, sendo o menor valor de PHA alcançado na DN de 600 kg ha^{-1} .

Ribeiro (2019) pesquisando a análise da sustentabilidade ambiental na cana-de-açúcar utilizando a pegada hídrica constatou consumo de água azul (PHA) de $214,0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na safra 2017/2018. Este valor é superior aos desse estudo para a pegada hídrica azul, provavelmente, em função do metabolismo C4 da cana-de-açúcar.

Em estudo sobre a pegada hídrica na produção de colmos de cana-de-açúcar cultivada com e sem irrigação, Santiago et al. (2017) verificaram um consumo de água azul de $52,0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Este resultado encontra-se próximo aos observados no presente estudo, no entanto, ainda é superior, podendo ser justificado pelo manejo utilizado no cultivo da cana-de-açúcar.

6.4.4. Pegada hídrica cinza

A partir das informações dos fungicidas e inseticidas (agrotóxicos) utilizados no cultivo da palma forrageira, foram determinadas as taxas de aplicações durante o período experimental, conforme apresenta a Tabela 2. Observa-se que, o inseticida Assist (Óleo Mineral) teve maior quantidade do produto químico aplicado durante o período experimental.

Tabela 2. Taxa de aplicação dos agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira.

Cultura	Agrotóxico	Classe	TAPC (L ha ⁻¹)	CP (g L ⁻¹)	NA	TAS (t ha ⁻¹)
Palma	Calda bordalesa	Fungicida	0,5	5,0	2,0	0,000005
Forrageira	Assist	Inseticida / acaricida	5,0	2,5	1,0	0,000013

*TAPC - Taxa de aplicação do produto comercial; CP - Concentração do produto; NA - Número de aplicações; e TAS - Taxa de aplicação da substância.

A utilização de agrotóxicos tem provocado à contaminação do meio ambiente, principalmente, pelo uso inadequado, e ainda é agravado em função da permanência das substâncias químicas por muito mais tempo do que o necessário no ambiente. Tavella et al. (2011) explicam que, é necessário tomar cuidados na aplicação dos agrotóxicos e com a disposição final adequada desses resíduos para não comprometer o meio ambiente.

Observa-se na Tabela 3, os fatores que influenciam no potencial da vazão de lixiviação das substâncias químicas dos agrotóxicos para os corpos de água. As propriedades químicas do solo, clima e da planta interferem no fator que determina o potencial de lixiviação e escoamento da substância presente no agrotóxico.

A área experimental foi classificada quanto à textura do solo como alto potencial de lixiviação; quanto ao conteúdo de matéria orgânica em baixo potencial; quanto à intensidade de precipitação em baixo potencial de lixiviação, já para o escoamento foi considerado como de baixo potencial de lixiviação.

O estado do fator que determina o potencial de lixiviação e escoamento é expresso como um valor entre 0 e 1. As propriedades químicas dos agrotóxicos como coeficiente de partição de carbono orgânico no complexo solo-água, persistência relevante à lixiviação e escoamento com 50% do tempo de duração, também foram classificados quanto ao fator que relaciona o potencial de lixiviação e escoamento.

A lixiviação e o escoamento superficial merecem destaque, visto que, o escoamento superficial favorece a contaminação das águas superficiais, enquanto que a lixiviação dos agrotóxicos através do perfil do solo resulta em contaminação das águas subterrâneas (SPADOTTO et al., 2004).

Tabela 3. Fatores que influenciam o potencial da vazão de lixiviação dos agrotóxicos.

Categoria		Agrotóxicos					
		Potencial de lixiviação e escoamento	Muito baixo	Baixo	Alto	Muito alto	
Fator		Valor (S) →	0,00	0,33	0,67	1,00	
		Peso (w) ↓					
Propriedades químicas	K _{oc} (L.kg ⁻¹)	10	>1000	1000-200	200-50	<50	
	PL (D _{T50} dias)	10	<10	10-30	30-100	>100	
	PE (D _{T50} dias)	10	<10	10-30	30-100	>100	
Fatores ambientais	Solo	TSL	15	Argila	Silte	Franco	Areia
		TSE	10	Areia	Franco	Silte	Argila
	Conteúdo MO*(dag. Kg ⁻¹)	20	Ótimo	Bom	Médio	Baixo	
		>7,00	>7,00	4,01-7,00	2,01-4,00	<2,00	
	Clima	IP (mm)	5	Baixa	Moderada	Alta	Muita alta
P (mm)		5	<600	600-1200	1200-1800	>1800	
Práticas culturais	PM	10	Ótima	Boa	Ruim	Péssima	

K_{oc} = Coeficiente de partição de carbono orgânico do complexo solo-água; PL = Persistência relevante à lixiviação (50% do tempo de duração); PE = Persistência relevante ao escoamento (50% do tempo de duração); TSL = Textura do solo relevante à lixiviação; TSE = Textura do solo relevante ao escoamento; IP = Intensidade da precipitação; P = Precipitação; e PM = Práticas de manejo relevante para o escoamento.

A partir da Tabela 3 obtiveram-se os valores e pesos para cada agrotóxico referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento das substâncias químicas. Para as condições da área experimental, o solo foi considerado como de textura franco, um conteúdo de matéria orgânica baixa, a intensidade de precipitação baixa e práticas culturais relativas ao escoamento baixa (Tabela 4).

O coeficiente de partição de carbono orgânico do complexo solo-água (K_{oc}) dos agrotóxicos Calda Bordalesa e Assist foi classificado como muito baixo. Segundo Canuto et al. (2010) o coeficiente de partição de carbono orgânico do complexo solo-água (K_{oc}) é um parâmetro que estima a partição de uma substância no sistema solo-água, ou seja, o quanto dela tem afinidade com o solo sem ser arrastada pela água.

Os agrotóxicos que possuem baixo K_{oc} apresentam baixa tendência de adsorver no solo, tendo mais facilidade de atingir os corpos aquáticos e, assim, possuem maior mobilidade

e alta solubilidade aumentando a probabilidade de contaminação das águas subterrâneas (CARBO et al., 2008; ARIAS-ESTÉVEZ, 2008).

Os agrotóxicos Calda Bordalesa e Assist foram classificados como de baixa persistência a lixiviação, enquanto para a persistência ao escoamento a Calda Bordalesa como de baixa persistência e o Assist como de muito baixa persistência.

O conhecimento da persistência destes agrotóxicos no solo é importante, pois a persistência dos agroquímicos no meio ambiente representa a sua capacidade em desenvolver atividade residual durante um determinado período, ou seja, com uma maior persistência possui maior risco de contaminação das águas (DAN et al., 2010).

Tabela 4. Valores e pesos dos agrotóxicos, dos fatores referentes às propriedades químicas, fatores ambientais e práticas culturais, que influenciam na vazão de lixiviação e escoamento na área de estudo.

Agrotóxico	K_{oc} ($L\ kg^{-1}$) 10*	PL (dias) 10*	PE (dias) 10*	TSL 15*	TSE 10*	MO ($dag\ Kg^{-1}$) 20*	IP 5*	P (mm) 5*	PM 10*
Calda Bordalesa	>1000 (0,00)	10-30 (0,33)	10-30 (0,33)	F (0,67)	F (0,33)	B (0,33)	B (0,00)	500 (0,00)	B (0,33)
Assist	>1000 (0,00)	10-30 (0,33)	<10 (0,00)	F (0,67)	F (0,33)	B (0,33)	B (0,00)	500 (0,00)	B (0,33)

F - referente à textura do solo (Franco); B - referente ao conteúdo de matéria orgânica (Baixo); B - referente à intensidade de precipitação da região (Baixa); B - referente às práticas culturais relevantes ao escoamento (Baixo). Koc - Coeficiente de partição de carbono orgânico do complexo solo-água; PL - Persistência relevante à lixiviação (50% do tempo de duração); PE - Persistência relevante ao escoamento (50% do tempo de duração); TSL - Textura do solo relevante à lixiviação; TSE - Textura do solo relevante ao escoamento; IP - Intensidade da precipitação; P - Precipitação; e PM - Práticas de manejo relevante para o escoamento.

Na área experimental, a textura do solo relevante à lixiviação (TSL) e ao escoamento (TSE) foram classificadas como de alta e baixa, respectivamente. O conteúdo de matéria orgânica presente no solo é baixo. A intensidade da precipitação é baixa e a precipitação muito baixa, e as práticas culturais do cultivo da palma forrageira foram consideradas baixas.

Matos et al. (2017) relatam que, estes fatores contribuem para que os agrotóxicos sejam ainda mais persistentes e causem maiores danos ao meio ambiente na área estudada. Segundo Augusto (2003), o uso intenso de agrotóxicos em regiões com precipitação concentrada apenas em uma época do ano, ou mesmo pelo uso da irrigação, provocam forte escoamento superficial, além da contaminação dos recursos hídricos disponíveis.

Na tabela 5 encontra-se a pegada hídrica cinza de cada agrotóxico utilizado em um hectare cultivado com palma forrageira na área experimental. Observa-se que, a Calda Bordalesa possui maior valor para fração de lixiviação-vazão. O óleo mineral (Assist) evidenciou a maior taxa total de aplicação da substância e carga de poluente na substância, sendo considerada a mesma concentração máxima permitida.

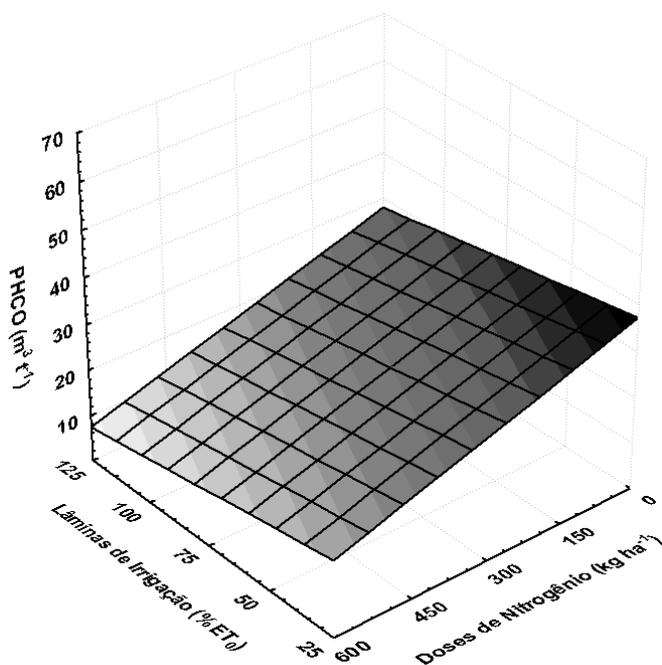
O agrotóxico Assist (óleo mineral) favoreceu o maior valor de pegada hídrica cinza em 01 hectare cultivado com palma forrageira. Desta forma, a pegada hídrica cinza para a palma forrageira foi calculada, levando em consideração o poluente mais crítico (Assist), pois o volume de água necessário para diluir o poluente mais crítico automaticamente dilui os poluentes menos críticos.

Tabela 5. Pegada hídrica cinza devido à exploração agrícola, de cada agrotóxico utilizado em um hectare cultivado com palma forrageira.

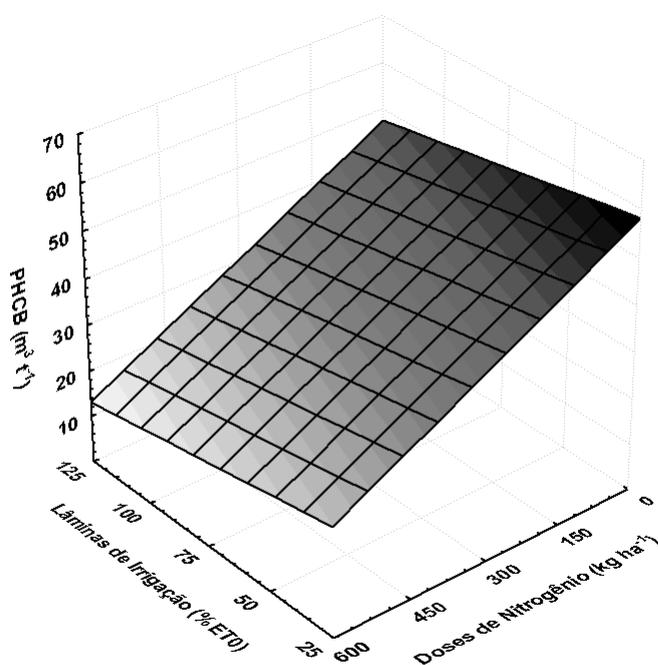
Cultura	Agrotóxico	α	T _{apl} (t)	L (t)	C _{max} (t m ⁻³)	PHC* (m ³)
Palma	Calda Bordalesa	0,046	0,000005	0,0000002	1,0x10 ⁻¹⁰	2300,0
Forrageira	Assist	0,042	0,000013	0,0000005	1,0x10 ⁻¹⁰	5250,0

(α) - Fração de lixiviação-vazão; T_{apl} - Taxa total de aplicação da substância; L - Carga poluente da substância; C_{max} - Valor da concentração máxima permitida; *PHC - Pegada hídrica anual da substância devido à exploração agrícola de 01 hectare.

A pegada hídrica cinza (PHC), levando em consideração o poluente mais crítico (Assist) para as três cultivares de palma forrageira estudada em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio encontram-se na Figura 3.



$$PHCO (m^3 t^{-1}) =$$



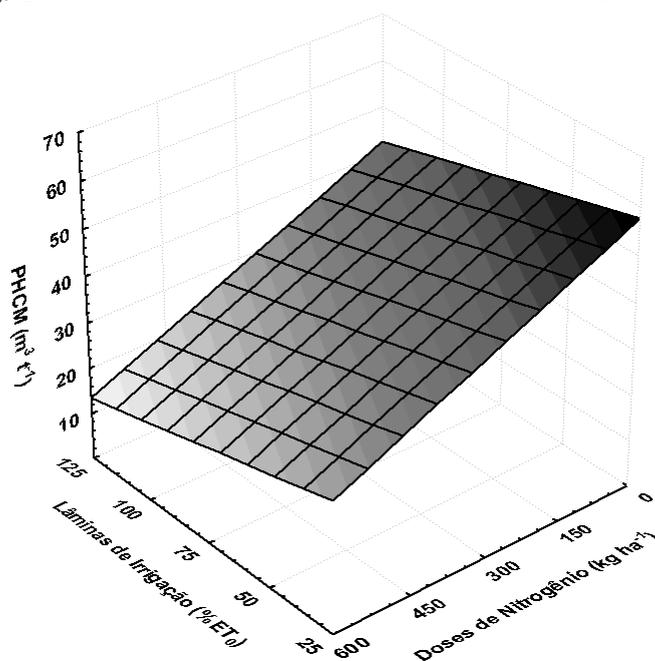
$$PHCB (m^3 t^{-1}) =$$

$$39,4437-0,0341*DN-0,0924*LI$$

$$R^2 = 0,92 **$$

$$60,8483-0,057*DN-0,1074*LI$$

$$R^2 = 0,98 **$$



$$PHCM (m^3 t^{-1}) = 61,4894-0,0484*DN-0,1528*LI$$

$$R^2 = 0,90 **$$

Figura 3. Pegada hídrica cinza dos agrotóxicos para as cultivares de palma forrageira Orelha de Elefante (PHCO), Baiana (PHCB) e Miúda (PHCM) em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. *, ** Significativo a 0,05 e 0,01 de probabilidade, respectivamente.

A maior necessidade de água para diluir os poluentes (PHC), para as três cultivares de palma forrageira foi observada nos tratamentos irrigados com 25% da ET_0 e fertirrigado com 0 kg ha^{-1} de nitrogênio, sendo as médias de 37,1, 58,2 e $57,7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$, respectivamente, para Orelha de Elefante, Baiana e Miúda. Estes valores de pegada hídrica cinza é o volume de água doce necessário para assimilar a carga dos poluentes, com base nos padrões de qualidade ambiental da água (HOEKSTRA & CHAPAGAIN, 2008; HOEKSTRA, 2011).

O aumento da lâmina de irrigação reduziu o consumo de água cinza (PHC), onde a menor pegada hídrica cinza foi constatada com 125% da ET_0 . Isto pode ser justificado pelo maior volume de água ter diluído os poluentes e dessa forma, reduzindo a pegada hídrica cinza dos agrotóxicos utilizados no cultivo da palma forrageira.

Quando aumentou a dose de nitrogênio aplicada ocorreu uma redução na pegada hídrica cinza, sendo o menor consumo de água necessário para diluir os poluentes observados na dose de 600 kg ha^{-1} de nitrogênio. Outro fator que contribuiu para redução da PHC, foi a maior produtividade das cultivares de palma forrageira observada na maior dose de nitrogênio aplicada.

Silva et al. (2015) constataram pegada hídrica cinza de $13,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ ao irrigar a cana-de-açúcar com 25% da ET_0 e de $11,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ na lâmina de irrigação de 100% da ET_0 . Observa-se que, o aumento da lâmina de irrigação também diminui a PHC, reafirmando os resultados obtidos no presente estudo.

6.4.5. Pegada hídrica total

Os valores totais das componentes verde, azul e cinza da pegada hídrica da palma forrageira cultivada sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio estão dispostos na Tabela 6.

Tabela 6. Pegada hídrica total verde, azul e cinza da palma forrageira cultivada sob lâminas de irrigação e doses de nitrogênio.

Cultivares	Pegada hídrica			PH Total (cultivares)
	Verde	Azul	Cinza	
			($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$)	
Orelha	17,3	9,4	22,3	49,0
Baiana	27,7	15,0	35,7	78,4
Miúda	27,6	15,5	35,5	78,6
PH Média	24,2	13,3	31,1	68,6

O menor valor de pegada hídrica total para as cultivares foi identificado na Orelha de Elefante ($49,0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$), enquanto que as cultivares Baiana ($78,4 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) e Miúda ($78,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$) tiveram as maiores pegadas hídricas totais. A menor pegada hídrica total pertencente a Orelha de Elefante, possivelmente, está relacionada à maior produção de biomassa verde desta cultivar quando comparada a Baiana e Miúda.

Para as componentes verde, azul e cinza o menor consumo foi de água azul ($13,3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$), seguido do consumo de água verde ($24,2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$), sendo o maior consumo de água cinza ($31,1 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$), e pegada hídrica total verde, azul e cinza de $68,6 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$. Portanto, no cultivo de palma forrageira a menor demanda foi de água proveniente do poço Amazonas (PH azul), e com isso, a contribuição da precipitação efetiva foi maior (PH verde), sendo o maior volume de água utilizado para a diluição dos poluentes (PH cinza).

Carvalho & Menezes (2014), estudaram a pegada hídrica da palma forrageira (*Opuntia* sp.) cultivada sob diferentes manejos de adubação e densidade de plantio, onde o cálculo foi realizado em função da precipitação pluvial e produtividade da cultura, e constataram pegada hídrica de $177,2 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (clone IPA-20); $211,7 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (cultivar gigante); $260,0 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (cultivar redonda) e $296,3 \text{ m}^3 \text{ t}^{-1}$ (cultivar miúda) (SANTOS et al., 2005). Os resultados destes autores

são superiores aos obtidos no presente estudo para a pegada hídrica total verde, azul e cinza da palma forrageira.

Mekonnen & Hoekstra (2011), estimaram a pegada hídrica média global para o sorgo forrageiro (metabolismo C4) de 2857,0; 103 e 87,0 m³ t⁻¹, respectivamente, para as pegadas hídricas verde, azul e cinza. Os valores obtidos para o sorgo são superiores aos alcançados no presente estudo. Os autores também indicaram a pegada hídrica média global da cana-de-açúcar (metabolismo C4) de 139,0, 57,0 e 13,0 m³ t⁻¹, respectivamente, para as pegadas hídricas verde, azul e cinza. A pegada hídrica cinza da cana-de-açúcar obtida por estes autores é inferior à dessa pesquisa.

6.5. CONCLUSÕES

O aumento na dose de nitrogênio aplicada reduziu a pegada hídrica verde, azul e cinza das cultivares de palma forrageira.

O acréscimo na lâmina de irrigação diminuiu a pegada hídrica verde e cinza, e aumentou a azul.

A cultivar Orelha de Elefante propiciou a menor pegada hídrica verde, azul e cinza.

A pegada hídrica é um importante indicador, capaz de monitorar o impacto do consumo de água das culturas irrigadas e adubadas sobre o meio ambiente.

A pegada hídrica das cultivares de palma forrageira irrigada e adubada é a menor encontrada na literatura, entre as plantas irrigadas, evidenciando o grande potencial dessa forrageira para regiões com pouca disponibilidade de água, como o semiárido brasileiro.

6.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen, R.G.; Pereira, L.S.; Raes, D.; Smith, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 300p. (FAO.Irrigation and Drainage Paper, 56).

Arias-Estevez, M. The mobility and degradation of pesticides in soils and the pollution of groundwater resources. **Agriculture, Ecosystems and Environment**. p. 123, 247–260. 2008.

Augusto, Lgs. Uso dos agrotóxicos no semi-árido brasileiro. In: PERES, F., and MOREIRA, J.C., orgs. **É veneno ou é remédio?: agrotóxicos, saúde e ambiente [online]**. Rio de Janeiro: Editora FIOCRUZ, 2003. p. 59-73. ISBN 85-7541-031-8. Available from Scielo Books.

- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). **Resolução nº 357, de 17 de março de 2005**. Brasília, DF, 2005
- Canuto, T. G.; Gama, A. F.; Barreto, F. M. De S.; Alencar Neto, M. Da F. A. Estimativa do risco potencial de contaminação por pesticidas de águas superficiais e subterrâneas do município de Tianguá-CE, com aplicação do método de GOSS e índice de GUS, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 16.; ENCONTRO NACIONAL DE PERFURADORES DE POÇOS, 17., 2010, São Luis. **Anais...** São Luis: ABAS, 2010. p. 01-20.
- Carbo L, Souza V, Dores EFGC, Ribeiro ML (2008) Determination of pesticides multiresidues in shallow groundwater in a cotton-growing region of Mato Grosso, **Brazil J Braz Chem Soc.** 19(6): 1111-1117.
- Carvalho, A. L.; Menezes, R. S. C.; Pegadas hídricas em sistemas agropecuários na região semiárida do Nordeste do Brasil. **Revista Agro@mbiente On-line**, v.8, n.1, p.142-148, 2014.
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y. The blue, green and grey water footprint of rice from production and consumption perspectives. **Ecological Economics**, v.70, n.4, p.749-758, 2011.
- Chapagain, A. K.; Hoekstra, A. Y. The global component of freshwater demand and supply: An assessment of virtual water flows between nations as a result of trade in agricultural and industrial products. **Water International**, v.33, n.1, p.19-32, 2008.
- Dan, H.A.; Dan, L.G.M.; Barroso, A.L.Li; Procópio, S.O.; Oliveira Jr., R.S.; Assis, R.L.; Silva, A.G.; Feldkircher, C. Seletividade do herbicida tembotrione a cultura do milho. **Planta Daninha**, v. 28, n. 4, p.793-799, 2010.
- Dubeux Júnior, J. C. B.; Araújo Filho, J. T.; Santos, M. V. F.; Lira, M. A.; Santos, D. C.; Pessoa, R. A. S. Potential of cactus pear in South América. Cactusnet Newsletter, **Santiago del Estero**, v.13, edição especial, p.29-40, 2013.
- Edvan, R. L.; Santos, E. M.; Vasconcelos, W. A.; Souto Filho, L. T.; Borburema, J. B.; Medeiros, G. R.; Andrade, A. P. Utilização da adubação orgânica em pastagem de capim-buffel (*Cenchrus ciliaris* cv. Molopo). **Archivos de Zootecnia**, v.59, n.228, p.499-508, 2010.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 4.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2014. 353p.

- FRANKE, N. A.; BOYACIOGLU, H.; HOEKSTRA, A. Y. **Grey water footprint accounting – Tier 1 Supporting Guidelines**. Delft, The Netherlands: UNESCO –IHE, 2013. 64p. (Value of Water Research Report Series, n.65).
- Gerbens-Leenes, P. W.; Hoekstra, A. Y.; Van Der Meer, Th. The water footprint of energy from biomass: A quantitative assessment and consequences of an increasing share of bio-energy in energy supply. **Ecological Economics**, v.68, n.4, p.1052-1060, 2009.
- Hoekstra, A. Y. How sustainable is Europe's water footprint?. **Water and Wastewater International**, v.26, p.24-26, 2011.
- Hoekstra, A. Y.; Chapagain, A. K.; Aldaya, M. M.; Mekonnen, M. M. **The water footprint assessment manual**. 1.ed. London: Water Footprint Network, 2011. 224p.
- Hoekstra, A. Y.; Hung, P. Q. **Virtual water trade: a quantification of virtual water flows between nations in relation to international crop trade**. Value of Water Research Report Series. No. 11. UNESCO-IHE, Delft, the Netherlands, 2002.
- HOEKSTRA, A.Y.; CHAPAGAIN, A. K. **Globalization of water: Sharing the planet's freshwater resources**. [S.l.]: Blackwell Publishing, 2008. 220p. ISBN:978-1-4051-6335-4 .
- INERIS – Portail Substances Chimiques. 2013 – Disponível em: <http://www.ineris.fr/substances/fr/page/9>. Acesso em 15 de dezembro de 2017.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa: UFV, 3. ed atual e ampliado. 2012. 355p.
- Matos, R. M.; Borges, V. E.; Lima, A. S.; Silva, P. F.; Dantas Neto, J.; Lima, V. L. A. Sustainability of the grey water footprint (GWF) for cultivation of onion in the Brazilian semi-arid regions. **Australian Journal of Crop Science**, v.11, n.6, p.749-756, 2017.
- Medeiros, R. M.; Francisco, P. R. M.; Matos, R. M.; Santos, D.; Sousa, T. P.; Caracterização agroclimática e aptidão de culturas para diferentes municípios e regiões da Paraíba. **Revista Agropecuária Científica no Semi-Árido**, v.11, n.2, p.99-110, 2015.
- Mekonnen, M. M.; Hoekstra, A. Y. The green blue and grey water footprint of crops and derived crop products. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v.15, n.1, p.1577-1600, 2011.
- Nyambo, P.; Wakindiki, I. I. C. Water footprint of growing vegetables in selected smallholder irrigation schemes in South Africa. **AJOL**, v. 41, n.4, p.5571-578, 2015.
- Pinheiro, K. M.; Silva, T. G. F.; Carvalho, H. F. S.; Santos, J. E. O.; Morais, J. E. F.; Zolnier, S.; Santos, D. C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. **Revista Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.49, n.12, p.939-947, 2014.

- Ribeiro, G. A. **Análise da sustentabilidade ambiental na agroindústria canavieira utilizando a pegada hídrica**. 2019.125f. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2019.
- Rivas Ibáñez, G.; Molina Ruíz, B. J. M.; Román Sánchez, M. I.; Casas López, J. L. A corporate water footprint case study: The production of Gazpacho, a chilled vegetable soup. **Water Resour and Industry**, v.17, n.1, 34-42, 2017.
- Rodriguez, J. L. **Atlas Escolar Paraíba**. João Pessoa: Editora Grafset, 2002.
- Roux, B. L.; Vahrmeijer, T.; Keith, L.; Bristow, K. L. Estimating water footprints of vegetable crops: influence of growing season, solar radiation data and functional unit. **Water**, v.8, n.10, p.473-493, 2016.
- Sales, A. T.; Leite, M. L. M. V.; Alves, A. Q.; Ramos, J. P. F.; Nascimento, J. P. Crescimento vegetativo de palma forrageira em diferentes densidades de plantio no Curimatú Paraibano. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v. 7, n. 1, p. 19-24, 2013.
- Santiago, A. D.; Chico, D.; Andrade Junior, A. S.; Garrido, A.; Carnaúba, P. J. P. Pegada hídrica da cana-de-açúcar e etanol produzidos no estado de Alagoas, Brasil. **Revista Agrometeoros**, v.25, n.1, p.209-216, 2017.
- Santos, D. C.; Farias, I.; Lira, M. A.; Dias, F. M.; Santos, M. V. F.; Ferraz, I. Produtividade de clones de palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*), Caruaru-PE. In: VII ZOOTEC, 2005, Campo Grande, MS. **Anais do VII ZOOTEC**. Campo Grande, MS: Associação Brasileira de Zootecistas, v.único, 2005. p.1-5.
- Santos, D. C.; Farias, I.; Lira, M. A.; Santos, M. V. F.; Arruda, G. P.; Coelho, R. S. B.; Dias, F. M.; Melo, J. N. **Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea*) em Pernambuco**. Recife: IPA, 2006. 48p. (IPA. Documentos, 30).
- Silva, P. F. **Crescimento e produtividade de palma forrageira sob diferentes lâminas de irrigação e adubação nitrogenada**. 2017. 66f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande – PB, 2017.
- Silva, V. P. R.; Albuquerque, M. F.; Araújo, L. E.; Campos, J. H. B. C.; Garcêz, L. S. A.; Almeida, R. S. R. Medições e modelagem da pegada hídrica da cana-de-açúcar cultivada no Estado da Paraíba. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.6, p.521-526, 2015.
- Silva, V. P. R.; Aleixo, D. O.; Dantas Neto, J.; Maracajá, K. F. B.; Araújo, L. E. Uma medida de sustentabilidade ambiental: pegada hídrica. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.1, p.100-105, 2013.

- Spadotto, C.A. ; Gomes, M. A. F.; Luchini, L. C. ; Andréa, M. M. Monitoramento do risco ambiental de agrotóxicos: princípios e recomendações. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2004. 29p. (Documentos 42).
- Suassuna, P. **Lucratividade da Cultura da Palma Forrageira na Paraíba**. 1993. Disponível em:< www.joaosuassuna.hpg.ig.com.br/sistprod.htm - 5k ->. Acesso em 16 de outubro de 2017.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 5.ed. Porto Alegre:Artemed, 2013. 954p.
- Tavella, L.B. ; Silva, I. N.; Fontes, L. O.; Dias, J. R. M.; Silva, M. I. ; O uso de agrotóxicos na agricultura e suas consequências toxicológicas e ambientais. **Agropecuária Científica no Semiárido**, v.7, n.2, p.6-12, 2011.
- UE - Directive 2013/39/EU of the European Parliament and of the Council amending Directives 2000/60/EC and 2008/105/EC as regards priority substances in the field of water policy. European Union, Brussels. Belgium. 2013.