



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA
DOUTORADO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

PALLOMA VITÓRIA CARLOS DE OLIVEIRA

ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS E COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA
DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE DE
AQUICULTURA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

MOSSORÓ

2025

PALLOMA VITÓRIA CARLOS DE OLIVEIRA

**ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS E COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA
DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE DE
AQUICULTURA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso de Resíduos e seus Impactos no Solo e da Água

Orientador: Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr.

Coorientadora: Phâmella Kalliny Pereira Farias, Prof^a. Dra.

MOSSORÓ

2025

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

O48a Oliveira, Palloma Vitória Carlos de .
 Atributos morfológicos e composição químico-
 bromatológica da palma forrageira miúda
 fertirrigada com efluente de aquicultura no
 semiárido potiguar / Palloma Vitória Carlos de
 Oliveira. - 2025.
 91 f. : il.

 Orientador: Rafael Oliveira Batista.
 Coorientadora: Phamella kalliny Pereira Farias.
 Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural
 do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
 Manejo de Solo e Água, 2025.

 1. Reúso de água. 2. Efluente aquícola. 3.
 Fertirrigação. 4. Nopalea cochenillifera. 5.
 Economia circular. I. Batista, Rafael Oliveira ,
 orient. II. Farias, Phamella kalliny Pereira, co-
 orient. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada por sistema gerador automático em conformidade
com AACR2 e os dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Biblioteca Campus Mossoró / Setor de Informação e Referência
Bibliotecária: Keina Cristina Santos Sousa e Silva
CRB: 15/120

O serviço de Geração Automática de Ficha Catalográfica para Trabalhos de Conclusão de Curso (TCC's) foi desenvolvido pelo Instituto de Ciências Matemáticas e de Computação da Universidade de São Paulo (USP) e gentilmente cedido para o Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (SISBI-UFERSA), sendo customizado pela Superintendência de Tecnologia da Informação e Comunicação (SUTIC) sob orientação dos bibliotecários da instituição para ser adaptado às necessidades dos alunos dos Cursos de Graduação e Programas de Pós-Graduação da Universidade.

PALLOMA VITÓRIA CARLOS DE OLIVEIRA

**ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS E COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA
DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE DE
AQUICULTURA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido como requisito para obtenção do título de Doutora em Manejo de Solo e Água.

Linha de Pesquisa: Tratamento e Uso de Resíduos e seus Impactos no Solo e da Água

Defendida em: 29 / 08 / 2025.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **RAFAEL OLIVEIRA BATISTA**
Data: 26/11/2025 13:47:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr.
(UFERSA) Presidente

Documento assinado digitalmente
 **ANTONIO GUSTAVO DE LUNA SOUTO**
Data: 26/11/2025 09:06:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Antônio Gustavo de Luna Souto, Prof. Dr.
(UFERSA) Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **DORGIVAL MORAIS DE LIMA JUNIOR**
Data: 25/11/2025 17:54:21-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dorgival Moraes de Lima Junior, Prof. Dr.
(UFERSA) Membro Examinador

Documento assinado digitalmente
 **JOAQUIM EMANUEL FERNANDES GONDIM**
Data: 25/11/2025 15:43:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Joaquim Emanuel Fernandes Gondim, Prof.
Dr. (UVA) Membro Examinador Externo

Documento assinado digitalmente
 **LUIZ FERNANDO DE SOUSA ANTUNES**
Data: 25/11/2025 15:28:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Luiz Fernando de Sousa Antunes, Prof. Dr.
(UFERSA) Membro Examinador

*Com profunda gratidão, dedico estas poucas linhas a uma pessoa de grande importância em minha vida, meu avô **Raimundo Carlos do Nascimento** (in memoriam).*

*Dedico este trabalho aos meus amados pais, **José Oliveira e Veronilde Carlos**, à minha querida irmã, **Pâmara Virna**, à minha amada avó **Maria Lobo** e ao meu noivo, **Claudio Miro Neto**, cujo amor e carinho foram meu alicerce (presentes).*

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, expresso minha eterna gratidão a Deus, cuja luz guiou meus passos ao longo de toda esta jornada, sustentando-me nos momentos mais desafiadores e fortalecendo meu espírito para nunca desistir dos meus sonhos.

À minha família, que sempre foi meu alicerce fundamental. Aos meus pais, José Oliveira e Veronilde Carlos, pelo amor incondicional, pelo apoio incansável e por todos os esforços que dedicaram para que eu alcançasse esta conquista. Aos meus avós, Raimundo Carlos (*in memoriam*) e Maria Lobo (Lalia), pelo incentivo constante, pelos valiosos ensinamentos e pelo afeto que sempre me inspiraram a seguir em frente. À minha irmã, Pâmara Virna, cujo carinho e apoio foram pilares nos momentos mais difíceis.

Ao meu noivo, Claudomiro Neto, meu melhor amigo e companheiro de todas as horas, pela paciência, compreensão e amor que tornaram essa caminhada mais leve e significativa.

Ao meu querido orientador Rafael Oliveira, pelo companheirismo, pela dedicação e por não medir esforços para auxiliar na condução desse trabalho. Sem sua contribuição, a realização deste sonho não teria sido possível.

À minha coorientadora Phâmella Farias que durante essa jornada compartilhou não apenas o trabalho de campo, as análises laboratoriais e a tabulação de dados, como também cada momento de alegria, angústia e superação.

Aos irmãos que conquistei nesta trajetória, Francisco Eder e Tereza Rocha, sua parceria foi essencial para vencer os obstáculos desta jornada.

A Salenilda Soares, minha amiga desde a graduação, que sempre esteve comigo nos momentos bons e principalmente, que segurou minha mão nos momentos mais difíceis.

A Laio Ariel, pela fundamental orientação e pela paciência durante a realização das análises estatísticas dos dados desta tese.

À UFERSA, minha segunda casa, minha profunda gratidão por ter sido o palco da construção de uma trajetória acadêmica tão significativa, onde conquistei minha graduação, mestrado e, agora, o doutorado.

A todos os professores e técnicos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho. Um agradecimento especial ao professor José Francismar de Medeiros, por ceder a estrutura do seu laboratório, e ao amigo Fagner Nogueira, pelo auxílio essencial nas análises laboratoriais.

Às técnicas Paula Romyne, Maria Valdete e Ana Kaline, do Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta, pela paciência e orientação. Aos técnicos Luiz Odonil e Antônia Vilma, do Laboratório de Nutrição Animal, pelo suporte fundamental, e a José Gustavo, do Laboratório de Tecnologia de Alimentos, pelo conhecimento compartilhado.

Aos membros da banca examinadora, Dorgival Moraes, Luiz Fernando, Antônio Gustavo e Joaquim Gondim pela disponibilidade, pela aceitação do convite e pelas contribuições que enriquecerão este trabalho.

Aos funcionários do setor de aquicultura, pela ajuda na coleta do efluente, e ao funcionário terceirizado Alfran Silva, pelo apoio indispensável durante a condução do experimento no campo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro.

Por fim, a todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para esta conquista, meu profundo agradecimento. Cada gesto de apoio foi fundamental para que este sonho se tornasse realidade.

De coração, meu mais sincero obrigada.

“Sejam fortes e corajosos. Não tenham medo nem fiquem apavorados por causa delas, pois o Senhor, o seu Deus, vai com vocês; nunca os deixará, nunca os abandonará”.

RESUMO GERAL

A escassez hídrica no semiárido exige soluções sustentáveis. Nesse sentido, o reuso de efluentes aquícolas, ricos em nutrientes, na fertirrigação da palma forrageira surge como alternativa estratégica para superar as limitações da produção animal, melhorar a qualidade da forragem e integrar a aquicultura na economia circular. Este estudo teve como objetivo avaliar os atributos morfológicos, produtivos e bromatológicos da palma forrageira miúda fertirrigada com efluente aquícola no semiárido potiguar. A instalação do experimento ocorreu na Unidade Experimental de Reuso de Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, Brasil. O estudo foi conduzido no delineamento experimental de blocos casualizados, com cinco tratamentos de diluição de efluente (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e cinco repetições. A palma foi irrigada mediante regime de alternância semanal entre água de abastecimento e diluições de efluente aquícola durante 27 meses, aplicando-se lâmina bruta calculada com base na evapotranspiração da cultura (ETc). Amostras das diluições de efluente foram coletadas, bimestralmente, para caracterização de parâmetros físico-químicos referentes à fertirrigação. Após 27 meses de transplântio, avaliaram-se atributos morfológicos: altura e largura da planta; número, ordem de emissão, comprimento, diâmetro, perímetro e espessura dos cladódios; área ocupada, volume e peso fresco da fitomassa; e área fotossintética total. Simultaneamente, analisou-se a composição bromatológica: matéria seca, umidade, matéria mineral, matéria orgânica, extrato etéreo, fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido, lignina, hemicelulose, celulose, proteína bruta, nitrogênio proteico, nitrogênio não proteico, fibra em detergente neutro corrigida para cinzas e proteína, nutrientes digestíveis totais, carboidratos não fibrosos, açúcares solúveis totais, açúcares redutores e amido. Os dados foram submetidos a métodos multivariados envolvendo a correlação de Pearson, análise fatorial e análise de componentes principais, além de análise univariada. Os resultados do experimento demonstraram que a palma forrageira fertirrigada com efluente aquícola apresenta respostas distintas conforme a concentração aplicada. A fertirrigação com 25% de efluente aquícola mostrou-se ideal para maximizar o desenvolvimento vegetativo e o teor de proteína, sendo recomendada para animais em crescimento. Concentração de 100% de efluente produz forragem com maior densidade energética, adequada para vacas em lactação e animais em terminação. A cultura demonstrou notável estabilidade nutricional, mantendo qualidade consistente em diferentes concentrações. integração sustentável entre aquicultura e pecuária, promovendo o reuso de nutrientes e reduzindo a dependência de insumos externos.

Palavras-chave: Reuso de água, Efluente aquícola, Fertirrigação, *Nopalea cochenillifera*, Economia circular, Semiárido.

GENERAL ABSTRACT

Water scarcity in the semiarid region demands sustainable solutions. In this context, the reuse of nutrient-rich aquaculture effluents for fertigating forage cactus emerges as a strategic alternative to overcome the limitations of animal production, improve forage quality, and integrate aquaculture into the circular economy. This study aimed to evaluate the morphological, productive, and bromatological attributes of the small forage cactus (*Nopalea cochenillifera*) fertigated with aquaculture effluent in the semiarid region of Rio Grande do Norte. The experiment was set up at the Experimental Water Reuse Unit of the Federal Rural University of the Semi-Arid Region (UFERSA), in Mossoró-RN, Brazil. The study was conducted using a randomized block design with five effluent dilution treatments (0%, 25%, 50%, 75%, and 100%) and five replications. The cactus was irrigated using a weekly alternating regime between supply water and aquaculture effluent dilutions over 27 months, applying a gross depth calculated based on crop evapotranspiration (ET_c). Effluent dilution samples were collected every two months for characterization of physico-chemical parameters related to fertigation. After 27 months, the following morphological attributes were evaluated: plant height and width; number, emission order, length, diameter, perimeter, and thickness of cladodes; occupied area, volume, and fresh weight of phytomass; and total photosynthetic area. Simultaneously, the bromatological composition was analyzed: dry matter, moisture, mineral matter, organic matter, ether extract, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, lignin, hemicellulose, cellulose, crude protein, protein nitrogen, non-protein nitrogen, ash and protein-corrected neutral detergent fiber, total digestible nutrients, non-fibrous carbohydrates, total soluble sugars, reducing sugars, and starch. The data were subjected to multivariate methods involving Pearson correlation, factor analysis, and principal component analysis, in addition to univariate analysis. The results demonstrated that forage cactus fertigated with aquaculture effluent shows distinct responses depending on the concentration applied. Fertigation with 25% aquaculture effluent proved ideal for maximizing vegetative development and protein content, being recommended for growing animals. A 100% effluent concentration produced forage with higher energy density, suitable for lactating cows and finishing animals. The crop showed remarkable nutritional stability, maintaining consistent quality across different concentrations. This enables sustainable integration between aquaculture and livestock, promoting nutrient reuse and reducing dependence on external inputs.

Keywords: Water Reuse, Aquaculture Effluent, Fertigation, *Nopalea cochenillifera*, Circular Economy, Semiarid Region.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I: ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

- Figura 1 – Localização do Setor de Aquicultura e da Unidade Experimental de Reuso de Água na Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil.....27
- Figura 2 – Cultivo experimental de palma forrageira miúda sob fertirrigação com efluente aquícola.....28
- Figura 3 – Representação esquemática do delineamento experimental, elaborada no *software SketchUp*, destacando: 1 – Reservatório de água de abastecimento; 2 – Reservatório de efluente aquícola; 3 – Cabeçal de controle composto por registro de esfera, motobomba de 0,5 cv, manômetro graduado de 0 a 400 kPa e filtro de tela com abertura de 130 mm; 4 – Linha de derivação; 5 – Linhas laterais com emissores não autocompensantes de 1,6 L h⁻¹; e 6 – Bordadura.....29
- Figura 4 – Média mensal da variação temporal dos parâmetros climáticos monitorados....32
- Figura 5 – Coleta e preparo de amostras de solo em profundidades de 20-40 cm após 27 meses de cultivo de palma forrageira miúda.....34
- Figura 6 – Coleta de dados morfogênicos da palma forrageira miúda fertirrigada com água de abastecimento e diluições de efluente aquícola aos 27 meses de cultivo.....36
- Figura 7 – Coleta e processamento da palma forrageira miúda fertirrigada com água de abastecimento e diluições do efluente aquícola aos 27 meses de cultivo para mensuração de variáveis de produção.....38
- Figura 8 – Dendrograma horizontal da resposta da palma forrageira à aplicação de efluente da aquicultura em dois anos de cultivo da palma forrageira miúda.....43
- Figura 9 – Círculo de correlações para o fator 1 x fator 2, distribuição das variáveis (A) e distribuição das proporções de efluente de aquicultura e água de abastecimento no decorrer dos dois ciclos de cultivo da palma (B).....45
- Figura 10 – Círculo de correlações para o fator 2 x fator 3, distribuição das variáveis (A) e distribuição das proporções de efluente de aquicultura e água de abastecimento no decorrer dos dois ciclos de cultivo da palma (B).....46

CAPÍTULO II: COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Figura 1 – Localização da Unidade Experimental de Reúso de Água na Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil.....	63
Figura 2 – Representação esquemática do delineamento experimental, elaborada no <i>software SketchUp</i>	64
Figura 3 – Condições climáticas mensais registradas ao longo do período experimental (outubro/2021 a dezembro/2023).....	66
Figura 4 – Metodologia de amostragem e processamento de palma forrageira miúda irrigada com diluições de efluente aquícola para análises bromatológicas aos 27 meses de cultivo..	69
Figura 5 – Determinação do nitrogênio total após precipitação com ácido tricloroacético...	71
Figura 6 – Dendrograma horizontal das variáveis bromatológicas de palma forrageira miúda em resposta a fertirrigação com proporções de efluente aquícola ao fim de 27 meses de cultivo.....	75
Figura 7 – Análise de componentes principais dos parâmetros bromatológicos da palma forrageira fertirrigada com proporções de efluente aquícola definida por quatro fatores principais.....	77

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I: ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Tabela 1 – Parâmetros físico-químicos médios do efluente aquícola monitorados bimestralmente no segundo ano de cultivo.....	33
Tabela 2 – Evolução das propriedades físico-químicas do solo antes e após 27 meses de cultivo de palma forrageira miúda com diluições de efluente aquícola.....	35
Tabela 3 – Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda sob regime de fertirrigação alternada com água de abastecimento e proporções do efluente aquícola.....	41
Tabela 4 – Análise fatorial dos componentes principais para características morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda irrigada com proporções de efluente aquícola.....	44
Tabela 5 – Valores médios com desvio padrão dos atributos morfológicos e produtivos da palma forrageira miúda (<i>Nopalea cochenillifera</i>) fertirrigada com diferentes proporções de efluente aquícola.....	47
Tabela 6 – Emissão de cladódios por ordem (unidades) de palma forrageira miúda fertirrigada com efluente aquícola após 27 de transplantio.....	48

CAPÍTULO II: COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

Tabela 1 – Caracterização físico-química média do efluente aquícola monitorado a cada dois meses durante o segundo ano de cultivo da palma forrageira miúda (outubro/2022 a dezembro/2023)	67
Tabela 2 – Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros bromatológicos da palma forrageira miúda fertirrigada com diluições de efluente aquícola após 790 dias a campo.....	74
Tabela 3 – Análise fatorial dos componentes principais para características morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda fertirrigada com proporções de efluente aquícola....	76
Tabela 4 – Valores médios com desvio padrão dos parâmetros químico-bromatológicos da palma forrageira miúda fertirrigada com diferentes níveis de efluente aquícola.....	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AA	Água de abastecimento
AC	Área de cladódio
ACP	Análise de componentes principais
AFP	Área fotossintética por planta
AM	Amido
Aop	Área ocupada pela planta
AP	Altura de planta
AR	Açúcares redutores
AST	Açúcares solúveis totais
BR	Brasil
Ca ²⁺	Cálcio
CAERN	Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte
CAM	Metabolismo Ácido das Crassuláceas
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CC	Comprimento dos cladódios
CCA	Centro de Ciências Agrárias
CE	Condutividade elétrica
CEL	Celulose
CNF	Carboidratos não fibrosos
CO ₃ ²⁻	Carbonato
Cu ²⁺	Cobre
CuSO ₄	Sulfato de cobre
DC	Diâmetro dos cladódios
Dr.	Doutor
Dra.	Doutora
EA	Efluente da aquicultura
EC	Espessura dos cladódios

EE	Extrato etéreo
Ep	Espaçamento do plantio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
ETc	Evapotranspiração da cultura
ETo	Evapotranspiração de referência
FAO	Organização para Alimentação e Agricultura
FDA	Fibra em detergente ácido
FDN	Fibra em detergente neutro
FDNcp	Fdn foi ajustada para cinzas e proteína
Fe ⁺	Ferro
ha	Hectare
HCl	Ácido clorídrico
HCO ₃ ⁻	Bicarbonato
HEM	Hemicelulose
H ₂ O	Água
H ₂ SO	Ácido sulfúrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
K ⁺	Potássio
Kc	Coeficiente de cultura
K ₂ SO ₄	Sulfato de potássio
LANA	Laboratório de Nutrição Animal
LASAP	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta
LASAPSA	Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido
LIG	Lignina
LP	Largura de planta
Mg ²⁺	Magnésio
Mn ⁺	Manganês
MM	Matéria mineral

MO	Matéria orgânica
MS	Matéria seca
N	Nitrogênio
Na ⁺	Sódio
NC	Número de cladódios
NDT	Nutrientes digestíveis totais
ni	Número de plantas por hectare
NNP	Nitrogênio não proteico
NP	Nitrogênio proteico
NT	Nitrogênio total
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
P	Fósforo
PB	Proteína bruta
Pf	Peso fresco da fitomassa aérea
pH	Potencial hidrogeniônico
PMFpa	Área fotossintética por planta
PST	Porcentagem de sódio trocável
RN	Rio Grande do Norte
TCA	Ácido tricloroacético
TFSA	Terra fina seca ao ar
UERA	Unidade experimental de Reuso de Água
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
UM	Umidade
UVA	Universidade Estadual do Vale do Acaraú
Vf	Volume fresco da fitomassa
Zn ²⁺	Zinco

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	19
REFERÊNCIAS.....	20
CAPÍTULO I: ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUICOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR....	23
RESUMO.....	23
ABSTRACT.....	24
INTRODUÇÃO.....	25
MATERIAL E MÉTODOS.....	26
Caracterização da área e delineamento experimental.....	26
Estabelecimento de material vegetal.....	29
Protocolo de aplicação de efluente e monitoramento da qualidade da água de irrigação.....	30
Caracterização dos atributos físico-químicos do solo.....	33
Processamento, mensuração do crescimento e estimativa de produção de palma forrageira.....	35
Análise Estatística.....	40
RESULTADOS.....	41
Matriz de correlação.....	41
Agrupamento.....	42
Análise fatorial.....	43
Análise de Componentes principais (ACP).....	44
Teste de médias.....	47
DISCUSSÃO.....	48
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	54
REFERÊNCIAS.....	54
CAPÍTULO II: COMPOSIÇÃO QUÍMICO-BROMATOLÓGICA DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUICOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR.....	59
RESUMO.....	59
ABSTRACT.....	60
INTRODUÇÃO.....	61
MATERIAL E MÉTODOS.....	62
Local do estudo e delineamento experimental.....	62

Estabelecimento e manejo da palma forrageira miúda.....	64
Protocolo de fertirrigação e elementos meteorológicos monitorados.....	65
Monitoramento da qualidade da água.....	67
Coleta e preparo das amostras vegetais.....	67
Caracterização bromatológica da palma forrageira miúda.....	70
Análise Estatística.....	72
RESULTADOS.....	73
Matriz de correlação.....	73
Agrupamento.....	75
Análise fatorial.....	76
Análise dos Componentes principais (ACP).....	76
Teste de médias.....	78
DISCUSSÃO.....	79
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
REFERÊNCIAS.....	86
CONCLUSÃO GERAL.....	91

INTRODUÇÃO GERAL

A palma forrageira *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck consolida-se como cultura estratégica para a sustentabilidade da pecuária em regiões semiáridas, demonstrando produtividade média anual entre 20 e 50 toneladas de matéria verde por hectare (Araújo Júnior *et al.*, 2024). Estudos recentes evidenciam seu potencial multifuncional, transcendendo o uso forrageiro tradicional para aplicações industriais diversificadas, incluindo produção de bioetanol, géis alimentícios, corantes naturais e compostos farmacêuticos (Rajakal *et al.*, 2023).

Paralelamente, a expansão da aquicultura, outra atividade vital para o semiárido, traz consigo desafios ambientais significativos, particularmente devido ao grande volume de efluentes gerados. No cultivo intensivo de tilápias (*Oreochromis niloticus*), por exemplo, são liberados entre 100 e 200 litros de efluente para cada quilograma de peixe produzido, ao passo que na carcinicultura esse volume pode variar de 500 a 1.000 litros por quilograma de camarão. Esses efluentes, ricos em nutrientes como nitrogênio e fósforo, representam um risco potencial para os ecossistemas aquáticos quando descartados sem tratamento adequado, exigindo estratégias sustentáveis para seu manejo (Nogueira; Lordelo, 2022).

Neste contexto, a integração entre aquicultura e agricultura por meio do reúso de efluentes constitui modelo promissor e sustentável. Estudos demonstram que a irrigação da palma forrageira com efluentes tratados possibilita incrementos de até 40% na produção de biomassa fresca em comparação ao sequeiro (Reges *et al.*, 2019). Este sistema vai além do ganho produtivo, posicionando-se ainda como estratégia alinhada a múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contribuindo simultaneamente para ODS 6, ao reduzir o consumo de água; ODS 12, ao transformar nitrogênio em fertilizante; ODS 2, ao garantir produção de forragem resiliente; e ODS 15, ao prevenir a eutrofização da água e combater a desertificação (Velasco-Muñoz *et al.*, 2022).

Pesquisas com efluente de laticínios (Reges *et al.*, 2019) e esgoto doméstico tratado (Azevedo Junior *et al.*, 2020) evidenciaram respostas morfológicas positivas na palma forrageira. Particularmente, o uso de efluentes aquícolas pode apresentar vantagens adicionais em virtude do seu perfil nutricional balanceado, fornecendo nitrogênio, fósforo e potássio em proporções adequadas ao desenvolvimento da cultura (Quinto; Marchi; Soares, 2022). Esta prática pode reduzir em até 40% o consumo de água convencional enquanto transforma nutrientes dos efluentes em fertilizante natural.

A fisiologia peculiar da palma forrageira, com metabolismo ácido crassuláceano (CAM), confere-lhe elevada eficiência no uso da água (Miranda *et al.*, 2023). Esta

característica, associada ao sistema radicular fasciculado e superficial, permite à cultura aproveitar eficientemente os nutrientes presentes nos efluentes, com estudos reportando acúmulo preferencial de nutrientes nas raízes laterais quando irrigada com águas residuárias (Fonseca *et al.*, 2022). A resposta morfológica da palma forrageira à disponibilidade hídrica e nutricional manifesta-se a partir de alterações de parâmetros como área do cladódio, número de cladódios e espessura do mesófilo, indicadores sensíveis do status da planta (Santos *et al.*, 2024).

Adicionalmente, a qualidade bromatológica da palma forrageira mostra-se diretamente influenciada pelo manejo da fertirrigação. Estudos consolidam que a disponibilidade hídrica e nutricional, via aplicação de efluentes, eleva significativamente o teor de proteína bruta em decorrência da maior assimilação de nitrogênio pela planta (Santos *et al.*, 2024). Paralelamente, observa-se um incremento nos carboidratos não fibrosos, fundamentais para a energia metabolizável no ruminante, em resposta à maior síntese de açúcares solúveis favorecida pela irrigação (Pereira *et al.*, 2021). Quanto ao teor de matéria seca, embora possa sofrer uma redução devido ao acúmulo de água nos cladódios, sua produção absoluta por área pode ser ampliada pela fertirrigação, assegurando maior rendimento forrageiro (Castro *et al.*, 2020).

Diante disso, o presente estudo, conduzido em condições de campo durante 27 meses após o transplântio, investigou o reuso de efluentes aquícolas na fertirrigação da palma forrageira como solução técnica e ambientalmente sustentável para os desafios produtivos do semiárido. Por meio da integração de análises morfológicas, produtivas e químico-bromatológicas, avançando na compreensão dos mecanismos de adaptação da cultura às condições de fertirrigação com efluentes. Os resultados oferecem subsídios para construção de sistemas produtivos integrados que promovam segurança alimentar, uso eficiente de recursos hídricos e desenvolvimento sustentável no semiárido brasileiro.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. *et al.* Growth dynamic, productivity, evapotranspiration, and water-economic indices of forage cactus under different irrigation depths. **Agronomy**, [s. l.], v. 14, n. 4, p. 691, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2073-4395/14/4/691>. Acesso em: 21 abr. 2025.

AZEVEDO JUNIOR, M. S. *et al.* Growth and biomass production of prickly pear in the second cycle irrigated with treated domestic sewage. **Bioscience Journal**, [s. l.], v. 36, n. 1, p. 51–60, 2020. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/biosciencejournal/article/view/42175>. Acesso em: abr. 2025.

CASTRO, I. N. D. *et al.* Agronomic performance and water use efficiency of irrigated cactus pear cultivars. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 33, p. 529–540, 2020. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/WFwhTk34g9fXYK3DDnCNqBg/?lang=en>. Acesso em: 12 abr. 2025.

FONSECA, V. A. *et al.* Nutrients in ‘Gigante’ forage cactus pear under different saline water irrigation depths and planting densities. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 26, p. 381–389, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/BYLMr4cgBjy48DH9PNdCRnS/?lang=en>. Acesso em: 3 maio 2025.

MIRANDA, J. R. *et al.* Physiology of the forage cactus cultivate *Opuntia stricta* (Haw.) Haw under different irrigation frequencies in the Semiarid. **Revista Ceres**, [s. l.], v. 70, p. 24–31, 2023. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rceres/a/TgFMRMDgRDnnhFqspmm5T9S/?lang=en>. Acesso em: 15 fev. 2025.

NOGUEIRA, S. M. S.; LORDELO, S. A. V. **Tratamento de efluentes de piscicultura com microalgas**. 1. ed. [S. l.]: Editora Itacaiúnas, 2022. Disponível em: <https://quipaeditora.com.br/efluentes-piscicultura>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PEREIRA, G. A. *et al.* Intake, nutrient digestibility, nitrogen balance, and microbial protein synthesis in sheep fed spineless-cactus silage and fresh spineless cactus. **Small Ruminant Research**, [s. l.], v. 194, p. 106293, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092144882030242X>. Acesso em: 5 maio 2025.

QUINTO, L. B.; MARCHI, J.; SOARES, A. P. Agricultura familiar, economia circular e empreendedorismo rural: um estudo bibliométrico entre os anos de 2018 a 2021. **Revista Estudo & Debate**, [s. l.], v. 29, n. 3, 2022. Disponível em: <https://www.univates.br/revistas/index.php/estudoedebate/article/view/3121>. Acesso em: 23 maio 2025.

RAJAKAL, J. P. *et al.* Integration and Optimisation of Palm Oil Sector with Multiple-Industries to Achieve Circular Economy. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 40, p. 318–336, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550923001550>. Acesso em: 27 maio 2025.

REGES, K. S. L. *et al.* Growing, production and quality of thornless cactus irrigated with dairies effluent. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 11, n. 14, p. p175, 2019. Disponível em: <https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/40366>. Acesso em: 3 abr. 2025.

SANTOS, M. R. *et al.* Palma forrageira irrigada com água salina sob densidades de plantio em três ciclos produtivos. **Nativa**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 542–550, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/16356>. Acesso em: 3 maio 2025.

VELASCO-MUÑOZ, J. F. *et al.* Circular economy in agriculture. An analysis of the state of research based on the life cycle. **Sustainable Production and Consumption**, [s. l.], v. 34, p.

257–270, 2022. Disponível em:
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550922002573>. Acesso em: 17 abr.
2025.

CAPÍTULO I: ATRIBUTOS MORFOLÓGICOS DA PALMA FORRAGEIRA MIÚDA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

RESUMO

A crescente escassez hídrica demanda alternativas sustentáveis, como o reuso da água de efluentes aquícolas na fertirrigação de culturas adaptadas ao semiárido, como a palma forrageira miúda. Com o presente estudo, objetivou-se avaliar características morfológicas e produtivas da palma forrageira miúda fertirrigada com efluente aquícola no semiárido potiguar. A instalação do experimento ocorreu na Unidade Experimental de Reuso de Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró-RN, Brasil. O estudo foi conduzido no delineamento experimental de blocos casualizados, compreendendo cinco tratamentos (0A - 100% água - controle, 25A - 75% água + 25% efluente, 50A - 50% água + 50% efluente, 75A - 25% água + 75% efluente e 100A - 100% efluente) e cinco repetições. A palma foi irrigada em regime de alternância semanal, aplicando-se água de abastecimento na primeira semana e as respectivas diluições de efluente na semana subsequente, durante 27 meses, sendo a lâmina bruta obtida com base na evapotranspiração da cultura. Amostras das diluições de efluente foram coletadas, bimestralmente, para caracterização de parâmetros físico-químicos referentes à fertirrigação. Ao fim de 27 meses, avaliou-se a morfologia da palma, mensurando-se: altura e largura da planta; número, ordem de emissão, comprimento, diâmetro, perímetro e espessura dos cladódios. Calculou-se ainda área ocupada, volume e peso fresco da fitomassa, e área fotossintética total. Os dados foram submetidos a métodos multivariados envolvendo a correlação de Pearson, análise fatorial e análise de componentes principais, além de análise univariada. A análise univariada (teste de Tukey) confirmou que o tratamento com 25% de efluente na fertirrigação da palma forrageira promoveu os maiores valores para número de cladódios, área ocupada e produção de biomassa, diferindo significativamente ($p < 0,05$) dos demais tratamentos. Por sua vez, a análise multivariada revelou que o tempo de cultivo foi fator mais determinante que a concentração de efluente. Conclui-se que substituição de até 25% de água de abastecimento pelo efluente aquícola representa o ponto ótimo para equilíbrio entre nutrição e estresse salino, sendo ideal para sistemas que priorizam produtividade com sustentabilidade, principalmente em regiões com escassez hídrica.

Palavras-chave: Aquicultura sustentável, *Nopalea cochenillifera*, Economia circular, Aplicação de efluentes, Diluição ideal, Análise multivariada.

CHAPTER I: MORPHOPHYSIOLOGICAL RESPONSES OF FORAGE CACTUS FERTIGATED WITH AQUACULTURE EFFLUENT IN THE POTIGUAR SEMIARID REGION

ABSTRACT

Increasing water scarcity demands sustainable alternatives, such as reusing water from aquaculture effluents for fertigating crops adapted to the semiarid region, like the small forage cactus. This study aimed to evaluate morphological and productive characteristics of small forage cactus fertigated with aquaculture effluent in the semiarid region of Rio Grande do Norte. The experiment was installed at the Experimental Water Reuse Unit of the Federal Rural University of the Semi-Arid Region, in Mossoró-RN, Brazil. The study followed a randomized block design with five treatments (0A - 100% water - control, 25A - 75% water + 25% effluent, 50A - 50% water + 50% effluent, 75A - 25% water + 75% effluent, and 100A - 100% effluent) and five replications. The cactus was irrigated under a weekly alternating regime, applying supply water in the first week and the respective effluent dilutions in the subsequent week, over 27 months, with the gross depth based on crop evapotranspiration. Effluent dilution samples were collected every two months for characterization of physico-chemical parameters related to fertigation. After 27 months, cactus morphology was evaluated by measuring: plant height and width; number, emission order, length, diameter, perimeter, and thickness of cladodes. Additionally, occupied area, fresh phytomass volume and weight, and total photosynthetic area were calculated. Data were subjected to multivariate methods involving Pearson correlation, factor analysis, and principal component analysis, in addition to univariate analysis. Univariate analysis (Tukey test) confirmed that the treatment with 25% effluent in forage cactus fertigation promoted the highest values for number of cladodes, occupied area, and biomass production, differing significantly ($p < 0.05$) from other treatments. Multivariate analysis revealed that cultivation time was a more determining factor than effluent concentration. It is concluded that replacing up to 25% of supply water with aquaculture effluent represents the optimal point for balancing nutrition and salt stress, being ideal for systems that prioritize productivity with sustainability, particularly in regions with water scarcity.

Keywords: Sustainable aquaculture, *Nopalea cochenillifera*, Circular economy, Effluent application, Optimal dilution, Multivariate analysis.

INTRODUÇÃO

A água é um recurso fundamental para a sustentabilidade dos sistemas agropecuários e para a segurança alimentar global, porém sua crescente escassez, principalmente em áreas áridas e semiáridas do mundo, tem se tornado um dos maiores desafios do século XXI (Rosa *et al.*, 2020). O crescimento populacional, a expansão das atividades agropecuárias e as mudanças climáticas têm intensificado a pressão sobre os recursos hídricos, colocando em risco a segurança hídrica de diversas regiões. Cerca de 40% da população mundial já enfrentam restrições no acesso à água, e estimativas apontam que a demanda global por esse recurso poderá aumentar entre 20% e 30% até 2050 (Dias; Matos, 2023).

Embora o Brasil possua aproximadamente 12% da água doce disponível no planeta, sua distribuição é extremamente desigual, com as regiões semiáridas sofrendo severas limitações hídricas, o que exige soluções inovadoras para otimizar seu uso (Almeida, 2024). Dentre as alternativas, a água residuária da produção de peixes e camarões se destaca como alternativa estratégica para a produção de alimentos e o desenvolvimento econômico, especialmente no Nordeste brasileiro, onde representa 99,6% da produção nacional de camarão. Em 2022, o setor alcançou a marca de 70 mil toneladas, com crescimento de 18,3% em relação ao ano anterior, movimentando cerca de R\$ 2,63 bilhões (FAO, 2022).

No entanto, esse crescimento acarreta significativos passivos ambientais, especialmente pela geração de volumosos efluentes com alta concentração de nutrientes, como nitrogênio e fósforo. Quando lançados sem o tratamento adequado, esses subprodutos representam grave ameaça de contaminação e desequilíbrio ecológico em ecossistemas aquáticos, demandando, portanto, a implementação urgente de estratégias de manejo sustentável que mitiguem seus impactos (Ahmad *et al.*, 2021).

Diante desse cenário, o uso de efluentes aquícolas na agricultura emerge como alternativa promissora para reduzir os impactos ambientais e melhorar a eficiência no uso da água. Essa prática não apenas diminui a pressão sobre os recursos hídricos convencionais, como também fornece nutrientes essenciais para as culturas, reduzindo a dependência de fertilizantes sintéticos (Saraiva; Preto, 2023). No semiárido brasileiro, onde a disponibilidade de água é limitada, a integração entre aquicultura e agricultura pode representar um avanço significativo para a sustentabilidade dos sistemas produtivos, especialmente quando associada a culturas adaptadas a condições adversas (Magalhães *et al.*, 2024).

A palma forrageira destaca-se como cultura ideal para as condições semiáridas devido ao seu metabolismo CAM, que confere elevada eficiência no uso da água, e à capacidade de

prosperar em condições adversas, como escassez hídrica, solos pobres e com alta salinidade (Santos *et al.*, 2022). Dentre as variedades cultivadas no Brasil, a palma miúda sobressai-se pela maior resistência à cochonilha-do-carmim (*Diaspis echinocacti*) e por seu valor nutricional superior, com teores de proteína bruta variando entre 5% e 8% e digestibilidade acima de 70%. Pesquisas recentes evidenciam que o uso de águas residuárias pode aumentar significativamente características morfométricas da palma em comparação com sistemas de irrigação convencional (Nunes *et al.*, 2021).

Apesar do reconhecido potencial do efluente aquícola como fonte hídrica e nutritiva, a resposta morfológica da palma forrageira miúda a diferentes concentrações ainda não é totalmente compreendida. Dessa forma, partiu-se da hipótese de que a fertirrigação com efluente aquícola, em substituição parcial ou total à água convencional, promove alterações morfológicas significativas na cultura, podendo maximizar sua produtividade, testaram-se as seguintes premissas: diluições moderadas (25% e 50%) proporcionam o equilíbrio ideal entre nutrição e estresse, resultando em melhores respostas morfológicas; diluições superiores (75% e 100%) estimulam a produção de biomassa volumosa; e análises univariada e multivariada dos dados revelarão padrões de crescimento distintos e adaptação progressiva da planta ao longo dos ciclos. Diante disso, o presente estudo objetivou avaliar as características morfológicas e produtivas da palma forrageira miúda fertirrigada com efluente aquícola no semiárido potiguar.

MATERIAL E MÉTODOS

Caracterização da área e delineamento experimental

A pesquisa foi desenvolvida na Unidade Experimental de Reúso de Água (UERA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, Brasil (5°12'30,61"S; 37°19'08,36"O; altitude de 67 m), durante o período de outubro de 2021 a dezembro de 2023, totalizando 27 meses de avaliações (Figura 1).

O estudo compreendeu dois ciclos experimentais consecutivos: o primeiro ciclo (outubro/2021 a outubro/2022) gerou dados publicados anteriormente na tese de Pedrosa (2023) e no artigo subsequente (Pedrosa *et al.*, 2024), ao passo que o segundo ciclo (outubro/2022 a dezembro/2023) forneceu os resultados inéditos apresentados neste trabalho, permitindo avaliar os efeitos residuais dos tratamentos ao longo do tempo.

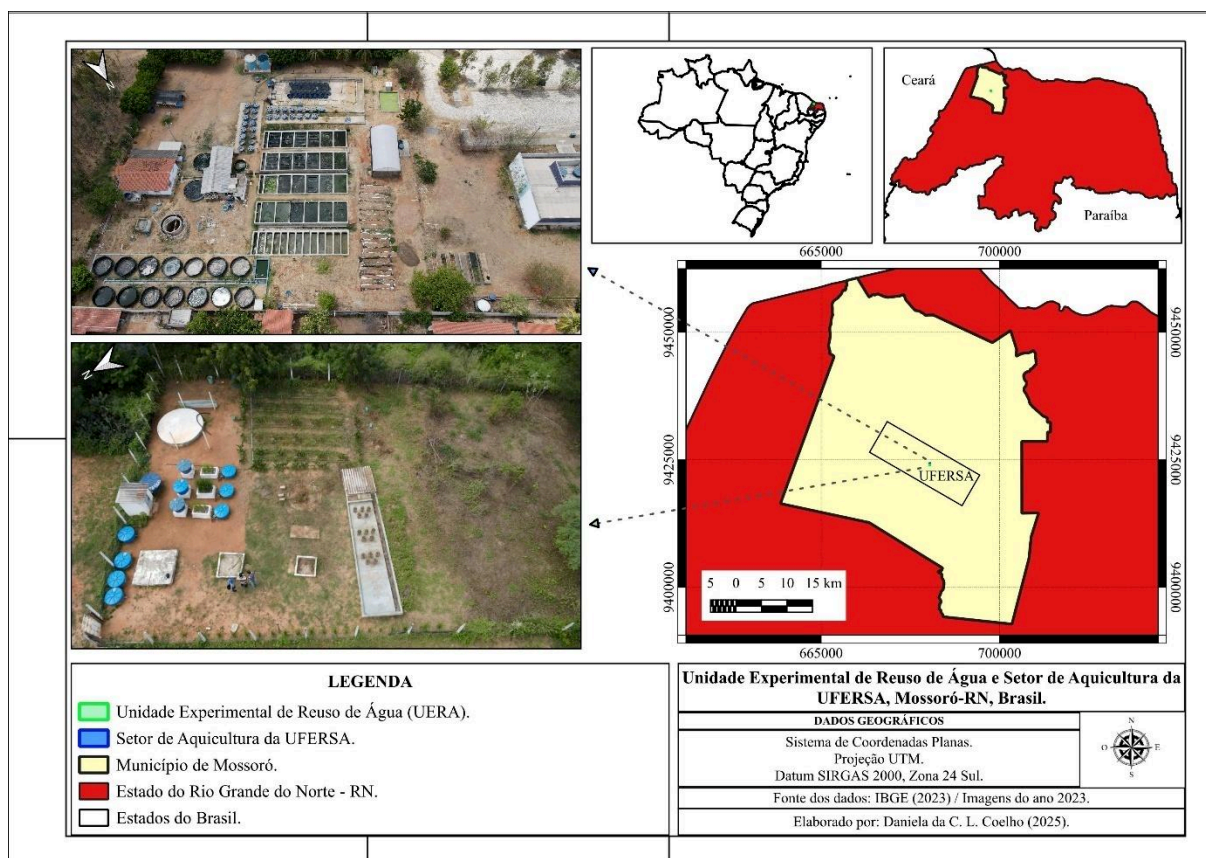


Figura 1. Localização do Setor de Aquicultura e da Unidade Experimental de Reuso de Água na Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil. Fonte: Elaborado por Coelho (2025). Base de dados: IBGE (2023).

A área experimental está inserida em região de clima semiárido quente (BSH na classificação de Köppen-Geiger), onde Mossoró possui altitude média de 55 m ao nível do mar, precipitação pluvial média anual de 794 mm, concentrada principalmente entre fevereiro e abril. A temperatura média anual é de 26,5 °C, com umidade relativa do ar em torno de 68,9%, conforme descrito por Dubreuil *et al.* (2018). O solo da área foi classificado como ARGISSOLO Vermelho-Amarelo eutrófico, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018).

Para instalação do experimento, foi demarcada uma área total de cerca de 62 m² (7,6 m de largura por 8,2 m de comprimento), onde foram distribuídas 25 parcelas experimentais com formato quadrado tendo 1 m² cada (1 m × 1 m), espaçadas em 0,80 m entre si. A área foi protegida por bordadura externa com afastamento das parcelas de 0,80 m e corredores internos com largura de 0,70 m para circulação (Figura 2).



Figura 2. Cultivo experimental de palma forrageira miúda sob fertirrigação com efluente aquícola. Fonte: Elaborado por Vale (2025).

O delineamento experimental adotado foi o de blocos casualizados, com cinco tratamentos e cinco repetições, totalizando 25 parcelas experimentais. Foram avaliados tratamentos de fertirrigação com proporções de efluente aquícola (EA) e água de abastecimento (AA) para redução dos níveis de salinidade, estabelecidas conforme protocolos técnicos para reúso agrícola de efluentes (Costa *et al.*, 2019). Os tratamentos consistiram em: 0A (100% AA - controle), 25A (75% AA + 25% EA), 50A (50% AA + 50% EA), 75A (25% AA + 75% EA) e 100A (100% EA). A distribuição espacial dos tratamentos no campo foi realizada de forma aleatorizada dentro de cada bloco, conforme ilustrado na Figura 3.

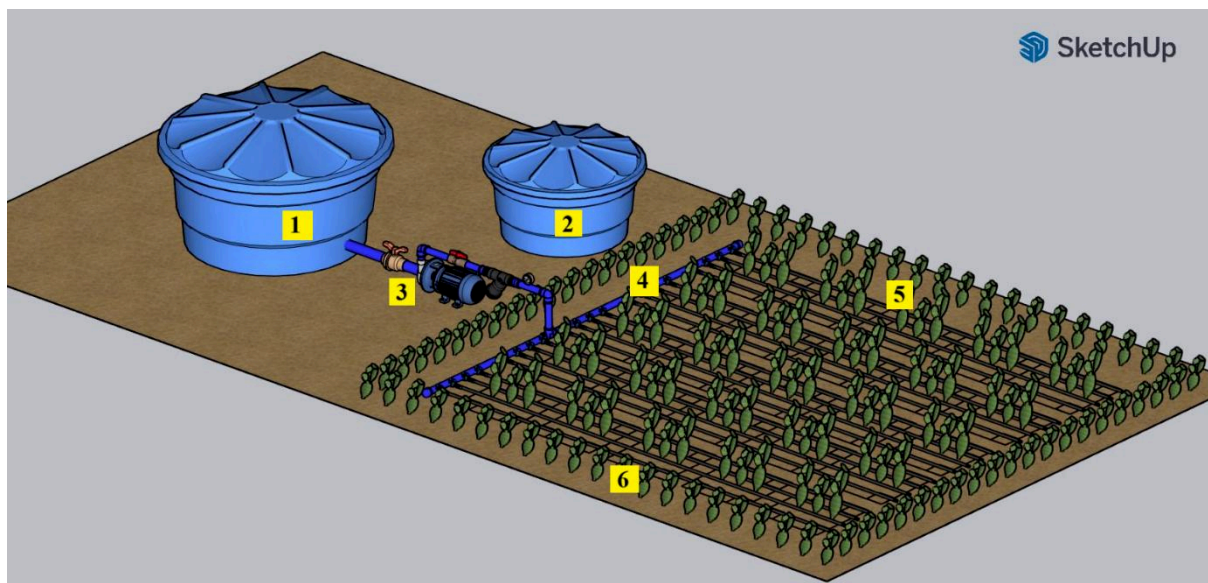


Figura 3. Representação esquemática do delineamento experimental, elaborada no *software SketchUp*, destacando: 1 – Reservatório de água de abastecimento; 2 – Reservatório de efluente aquícola; 3 – Cabeçal de controle composto por registro de esfera, motobomba de 0,5 cv, manômetro graduado de 0 a 400 kPa e filtro de tela com abertura de 130 mm; 4 – Linha de derivação; 5 – Linhas laterais com emissores não autocompensantes de $1,6 \text{ L h}^{-1}$; e 6 – Bordadura. Fonte: Elaborado por Vale (2025).

Estabelecimento de material vegetal

Para o experimento, foram selecionados cladódios de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck, provenientes de plantas-matrizes cultivadas sob condições controladas na Estação Experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), em Apodi-RN. O plantio foi realizado em 20 de outubro de 2021, utilizando cinco cladódios por parcela, uniformemente posicionados no centro da área experimental e espaçados em 0,2 m entre si, com orientação leste-oeste para maximizar a interceptação da radiação fotossinteticamente ativa.

O protocolo de implantação seguiu critérios técnicos para garantir o estabelecimento uniforme das plantas. Os cladódios, previamente cortados e submetidos a um período de cicatrização de 13 dias em ambiente sombreado, foram enterrados até a metade de seu comprimento, com a extremidade basal direcionada para o interior do solo. O arranjo espacial adotado (1,7 m entre linhas e 0,2 m entre plantas) resultou em uma densidade populacional de 29.412 plantas por hectare, otimizando tanto a interceptação luminosa quanto a eficiência no uso da água, conforme descrito por Pedrosa *et al.* (2024).

Aos 12 meses de cultivo, duas plantas das extremidades de cada parcela foram removidas para análises específicas, conforme descrito por Pedrosa *et al.* (2024), mantendo-se

três plantas centrais por parcela nas avaliações morfométricas e produtivas subsequentes referente ao presente estudo.

Aos 22 meses após o plantio, realizou-se adubação complementar com esterco bovino curtido, aplicado na dose de 20 t ha⁻¹. O esterco bovino foi proveniente do Setor de Bovinocultura da UFERSA, foi criteriosamente incorporado em sulcos localizados a 20 cm da base das plantas e 15 cm de profundidade, seguindo as recomendações de Santana *et al.* (2021), para cultivos nas condições semiáridas. Essa estratégia buscou otimizar a disponibilidade de nutrientes, minimizando perdas por volatilização e evitando o contato direto com os tecidos vegetais, conforme preconizado por Léo *et al.* (2019).

Protocolo de aplicação de efluente e monitoramento da qualidade da água de irrigação

O manejo da irrigação foi realizado em regime de alternância semanal, aplicando-se água de abastecimento na primeira semana e as respectivas diluições de efluente na semana subsequente. As irrigações foram suspensas sempre que ocorriam precipitações pluviais superiores a 20 mm nas 24 horas anteriores à aplicação programada. O efluente utilizado foi coletado no Setor de Aquicultura da UFERSA, ao passo que a água de abastecimento foi fornecida pela CAERN, proveniente da mistura das águas subterrâneas de poços profundos do município de Mossoró - RN e da água superficial da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves do município de Açu.

No segundo ano de cultivo, manteve-se o sistema de irrigação por gotejamento estabelecido inicialmente, com aplicação localizada e manual utilizando equipamentos aferidos (regadores de 13 L, baldes graduados de 11 L e provetas de 1 L). A lâmina de irrigação foi calculada com base na evapotranspiração da cultura (ET_C), determinada pelo método FAO-56 (Allen *et al.*, 2006), utilizando dados meteorológicos diários da estação automática Campbell instalada no campus Leste da UFERSA, localizada a cerca de 933 m da área experimental, aplicando-se a equação de Penman-Monteith para cálculo da evapotranspiração de referência (ET₀) (Equação 1).

$$ET_0 = \frac{0,408 \cdot \Delta \cdot (R_n - G) + \gamma \cdot \frac{900}{T + 273} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma \cdot (1 + 0,34 \cdot U_2)} \quad (1)$$

Adotou-se coeficiente de cultura (K_c) fixo de 0,70, conforme estabelecido por Lima *et al.* (2021) para palma forrageira nas condições semiáridas. A lâmina bruta foi ajustada mediante balanço hídrico simplificado (Doorenbos *et al.*, 1992), considerando como entradas a precipitação pluvial efetiva e a irrigação, e como saída a ET_c (Equação 2).

$$ET_c = ET_0 \cdot K_c \quad (2)$$

Em que:

ET_0 - Evapotranspiração de referência, em mm d^{-1} ;

R_n - Saldo de radiação à superfície, em $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

G - Fluxo de calor no solo, em $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$;

T - Temperatura do ar a 2 m de altura, em $^{\circ}\text{C}$;

U_2 - Velocidade do vento à altura de 2 m, em m s^{-1} ;

e_s - Pressão de saturação de vapor, em kPa;

e_a - Pressão de vapor atual do ar, em kPa;

$(e_s - e_a)$ - Déficit de pressão de vapor, em kPa;

Δ - Declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

γ - Constante psicrométrica, em $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$;

ET_c - Evapotranspiração da cultura, em mm d^{-1} ; e

K_c - Coeficiente de cultura, adimensional.

O balanço hídrico do experimento apontou total acumulado de 1589,44 mm de precipitação pluvial ao longo dos dois anos de cultivo. Desse total, foram registrados 943,78 mm no primeiro ano e 645,66 mm no segundo, conforme os dados fornecidos pela estação meteorológica da UFERSA. A irrigação complementar somou 492 mm, com 178 mm aplicados no primeiro ano e 314 mm no segundo, envolvendo tanto o uso de água de abastecimento quanto as diluições de efluente da aquicultura.

A Figura 4 apresenta a variação temporal mensal dos parâmetros climáticos monitorados: radiação solar, temperatura média do ar, precipitação pluvial e evapotranspiração de referência durante o período de 27 meses de cultivo da palma forrageira.

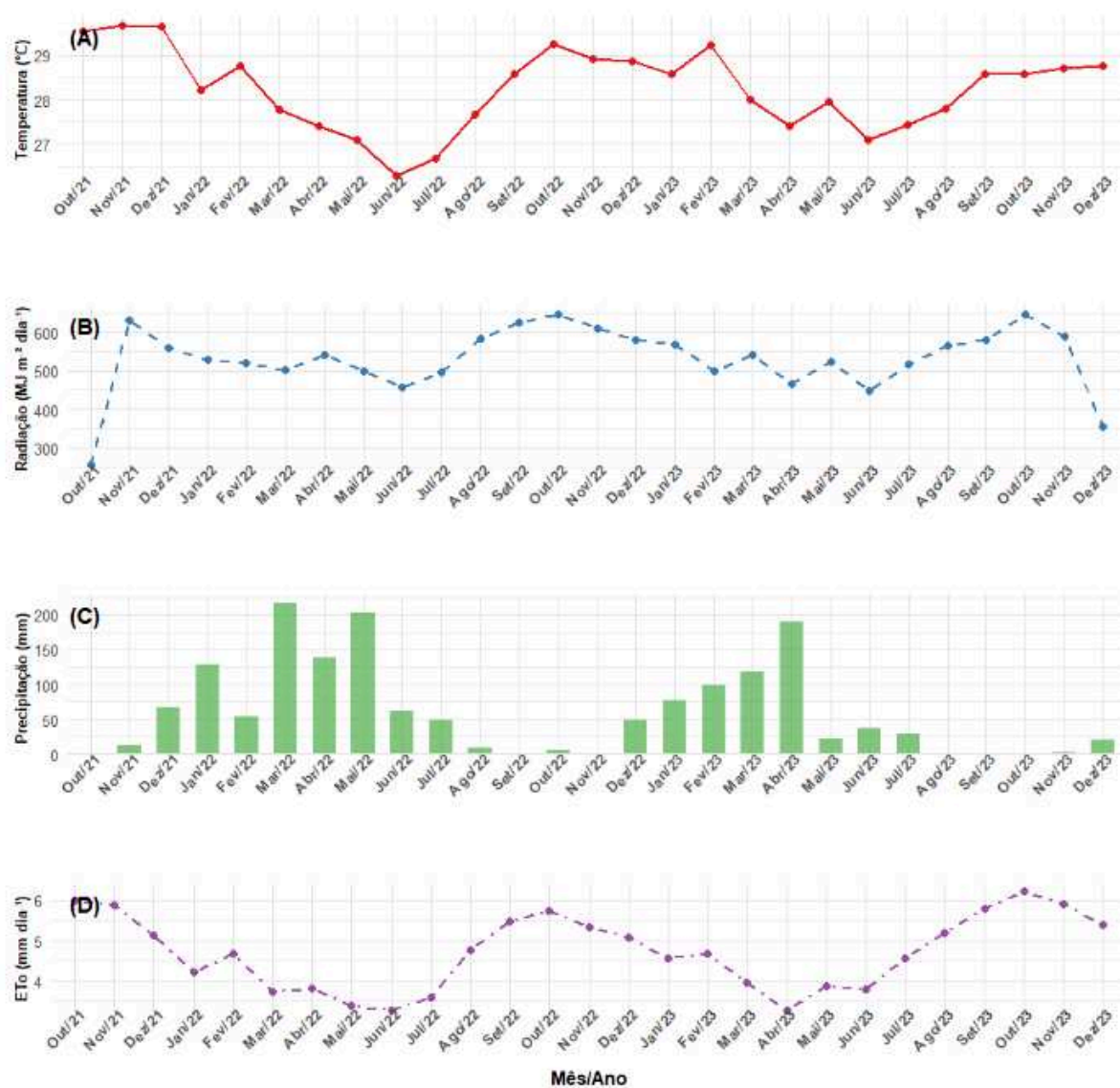


Figura 4. Média mensal da variação temporal dos parâmetros climáticos monitorados durante a condução dos dois períodos do experimento. Fonte: Autoria própria (2025).

A cada dois meses, foram coletadas amostras das cinco proporções de efluente aquícola na água de abastecimento para caracterização de atributos físico-químicos com potencial influência na produção e desenvolvimento da palma forrageira miúda. As análises foram realizadas no Laboratório de Análises de Solos, Água e Planta (LASAP/UFERSA), onde se determinaram os parâmetros: potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica (CE), ferro (Fe^+), manganês (Mn^+), zinco (Zn^{2+}), cobre (Cu^{2+}), teores de potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), cloreto (Cl^-), carbonato (CO_3^{2-}), bicarbonato (HCO_3^-), nitrogênio total pelo método de Kjeldahl (N) e fósforo total (P), conforme Tabela 1. As metodologias analíticas adotadas seguiram os procedimentos descritos por Rice, Baird e Eaton (2017), garantindo a padronização dos resultados obtidos.

Tabela 1. Parâmetros físico-químicos médios do efluente aquícola monitorados bimestralmente no segundo ano de cultivo.

Parâmetros	Média e desvio padrão dos tratamentos				
	0A	25A	50A	75A	100A
pH em H ₂ O	8,240 ± 0,525	7,650 ± 0,286	7,670 ± 0,273	7,580 ± 0,247	7,400 ± 0,376
CE (dS m ⁻¹)	0,470 ± 0,040	1,550 ± 0,170	2,650 ± 0,570	3,080 ± 0,930	4,740 ± 0,480
Fe ⁺ (mg L ⁻¹)	0,014 ± 0,030	0,126 ± 0,061	0,083 ± 0,089	0,117 ± 0,136	0,288 ± 0,274
Mn ⁺ (mg L ⁻¹)	0,000 ± 0,000	0,017 ± 0,027	0,010 ± 0,012	0,009 ± 0,008	0,019 ± 0,014
Zn ²⁺ (mg L ⁻¹)	0,005 ± 0,005	0,031 ± 0,019	0,030 ± 0,022	0,030 ± 0,015	0,043 ± 0,023
Cu ²⁺ (mg L ⁻¹)	0,000 ± 0,000	0,003 ± 0,003	0,004 ± 0,004	0,005 ± 0,003	0,008 ± 0,005
K ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,170 ± 0,129	0,250 ± 0,176	0,400 ± 0,282	0,530 ± 0,340	0,730 ± 0,415
Na ⁺ (mmol _c L ⁻¹)	3,350 ± 0,910	5,840 ± 1,539	3,310 ± 2,179	3,920 ± 2,241	4,620 ± 2,522
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,630 ± 0,143	4,240 ± 1,347	7,120 ± 1,520	9,880 ± 2,109	14,710 ± 4,142
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	0,560 ± 0,444	4,250 ± 1,834	8,610 ± 3,093	12,140 ± 4,365	17,960 ± 8,294
Cl ⁻ (mmol _c L ⁻¹)	2,820 ± 0,970	13,400 ± 5,990	17,710 ± 6,930	22,220 ± 8,480	30,520 ± 11,900
CO ₃ ⁻² (mmol _c L ⁻¹)	0,250 ± 0,140	0,400 ± 0,109	0,390 ± 0,127	0,420 ± 0,122	0,420 ± 0,139
HCO ₃ ⁻ (mmol _c L ⁻¹)	2,890 ± 0,300	3,200 ± 0,719	3,430 ± 1,315	4,590 ± 0,721	5,460 ± 0,955
N (mg L ⁻¹)	6,974 ± 3,051	8,517 ± 3,100	9,998 ± 3,994	10,010 ± 0,185	10,162 ± 4,020
P (mg L ⁻¹)	0,000 ± 0,000	3,450 ± 3,326	7,770 ± 3,770	11,730 ± 0,597	17,830 ± 7,836

Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: 0A - 100 de água - Controle; 25A – 75% de água e 25% de efluente; 50A – 50% de água e 50% de efluente; 75A – 25% de água e 75% de efluente; 100A – 100% de efluente; pH - Potencial hidrogeniônico; CE – Condutividade elétrica; Fe⁺ - Ferro; Mn - Manganês; Zn – Zinco; Cu - Cobre; K⁺ - Potássio; Na⁺ - Sódio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; Cl⁻ - Cloreto; CO₃⁻² – Carbonato; HCO₃⁻ - Bicarbonato; N - Nitrogênio total (N); e P - Fósforo total.

Caracterização dos atributos físico-químicos do solo

A amostragem de solo foi realizada em três momentos distintos: antes da aplicação dos tratamentos (outubro/2021); primeira avaliação anual (outubro/2022), cujos parâmetros físico-químicos foram reportados por Pedrosa *et al.* (2024) e avaliação final (dezembro/2023), com os resultados consolidados no fim deste estudo. Em cada coleta, as amostras foram retiradas nas profundidades de 0–20 cm e 20–40 cm, utilizando trado do tipo Holandês. 24 horas antes do horário previsto para a coleta das amostras de solo, utilizou-se um regador com capacidade de 13 L para umedecer o solo e facilitar a coleta das amostras nas duas profundidades estabelecidas.

Na coleta realizada antes do início do experimento, as amostras foram obtidas em cinco pontos distintos dentro da área experimental, conforme a delimitação do local. Após a coleta, as amostras simples foram homogeneizadas para formar amostras compostas nas duas profundidades. Para as coletas realizadas ao fim do primeiro ciclo e ao término do experimento, em cada parcela experimental foram retiradas duas amostras simples de cada camada (0–20 cm e 20–40 cm). Essas amostras simples, de mesma profundidade, foram então homogeneizadas

em bandejas de plástico, com o objetivo de criar uma amostra composta representativa para cada profundidade.

As amostras compostas foram, então, colocadas em bandejas de alumínio com capacidade para 500 g, devidamente identificadas conforme a profundidade de coleta, o tratamento aplicado e o bloco experimental correspondente e, em seguida, transportadas ao Laboratório de Qualidade de Água da (LASAPSA) da UFERSA – Mossoró, onde permaneceram secando ao ar por 48 horas e, posteriormente, foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada a 60 °C por 48 horas para promover a evaporação da umidade.

Após a secagem, foram transferidas para a sala de preparo e armazenamento do Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido (LASAPSA). Nessa etapa, as amostras foram destorroadas e passadas por uma peneira de 2 mm para obtenção de terra fina seca ao ar (TFSA) e então armazenadas em potes de polipropileno cilíndricos com sobretampa (capacidade: 500 mL), devidamente identificadas com informações sobre o tratamento, bloco experimental e profundidade de coleta (Figura 5).



Figura 5. Coleta e preparo de amostras de solo em profundidades de 0-20 cm e 20-40 cm após 27 meses de cultivo de palma forrageira miúda. Fonte: Imagem de autoria própria (2025). **Nota:** Retirada de amostras de solo em cada parcela experimental (A); Amostras compostas de cada parcela nas profundidades de 20 e 40 cm (B); Destorroamento das amostras de solo (C); Peneiramento do solo com peneira de 2 mm para obtenção de TFSA (D); Armazenamento em potes de plástico (E); e Realização de análises (F).

Com a TFSA obtida, procedeu-se à caracterização físico-química das amostras no LASAP para ambas as profundidades de coleta, seguindo as metodologias recomendadas pela Embrapa (Teixeira *et al.*, 2017). A Tabela 2 apresenta os atributos físico-químicos do solo antes e após 27 meses de cultivo de palma forrageira miúda com diluições de efluente aquícola.

Tabela 2. Evolução das propriedades físico-químicas do solo antes e após 27 meses de cultivo de palma forrageira miúda com diluições de efluente aquícola.

ATRIBUTOS FÍSICOS								
Parâmetros	Unidade	Profundidade (cm)	Inicial *	Após 27 meses de cultivo				
Areia	g kg ⁻¹	0-20	840,00	850,00				
		20-40	812,00	810,00				
Argila	g kg ⁻¹	0-20	50,00	100,00				
		20-40	94,00	90,00				
Silte	g kg ⁻¹	0-20	110,00	50,00				
		20-40	94,00	100,00				
Densidade	g cm ⁻³	0-20	1,63	1,68				
		20-40	1,43	1,59				
ATRIBUTOS QUÍMICOS								
Parâmetros	Unidade	Profundidade (cm)	Inicial *	0A	25A	50A	75A	100A
pH	H ₂ O	0-20	6,19	7,67	7,32	7,08	6,87	6,88
		20-40	6,55	7,65	7,25	7,11	6,98	6,93
CE	dS m ⁻¹	0-20	0,12	0,11	0,17	0,24	0,46	0,46
		20-40	0,09	0,06	0,12	0,17	0,24	0,26
MO	g kg ⁻¹	0-20	8,00	1,14	1,22	1,21	1,42	1,05
		20-40	4,20	0,64	0,85	0,71	0,61	0,76
CTC	cmolc dm ⁻³	0-20	5,07	4,58	5,54	6,67	7,38	6,84
		20-40	4,53	5,11	5,39	6,06	6,45	6,75
Ca ²⁺	cmolc dm ⁻³	0-20	3,17	2,28	2,95	3,26	3,53	3,13
		20-40	2,66	2,95	3,15	3,26	3,27	3,11
Mg ²⁺	cmolc dm ⁻³	0-20	1,55	1,69	1,62	1,61	1,60	1,92
		20-40	1,58	1,66	1,67	1,59	1,70	1,66
K ⁺	cmolc dm ⁻³	0-20	0,35	48,77	52,05	50,41	63,12	54,31
		20-40	0,29	59,23	58,41	65,99	75,02	53,90
Na ⁺	mg dm ⁻³	0-20	0,00	110,16	124,84	133,45	185,44	164,14
		20-40	1,90	77,66	96,46	114,27	112,70	110,55
P	mg dm ⁻³	0-20	153,40	29,53	31,95	28,39	25,58	31,01
		20-40	204,80	31,36	36,15	23,68	23,95	33,17
PST	%	0-20	0,00	10,53	9,92	8,83	10,99	10,35
		20-40	0,00	6,73	7,84	8,40	7,77	7,12

Fonte: Autoria própria (2025).

* Dados iniciais, antes da instalação do experimento (Pedrosa *et al.*, 2024).

Nota: 0A - 100 de água - Controle; 25A - 75% de água e 25% de efluente; 50A - 50% de água e 50% de efluente; 75A - 25% de água e 75% de efluente; 100A - 100% de efluente; pH - Potencial hidrogeniônico; CE - Condutividade elétrica; MO - Matéria orgânica; CTC - Capacidade de troca catiônica; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; K⁺ - Potássio; Na⁺ - Sódio; P - Fósforo total; e PST - Percentagem de sódio trocável.

Processamento, mensuração do crescimento e estimativa de produção de palma forrageira

As medições morfométricas da palma forrageira foram conduzidas ao fim do experimento (27 meses após o transplante). As variáveis vegetativas altura (AP) e largura da

planta (LP) foram mensuradas com fita métrica, bem como o número (NC) e a ordem de emissão dos cladódios (OC), determinados por contagem manual. Adicionalmente, registraram-se o comprimento (CC), diâmetro (DC) e perímetro (PC) dos cladódios, também medidos com fita métrica, ao passo que a espessura (EC) foi aferida com paquímetro digital calibrado, precisão de 0,01 mm (marca MTX, modelo 316119, faixa de 0 a 150 mm) (Figura 6).

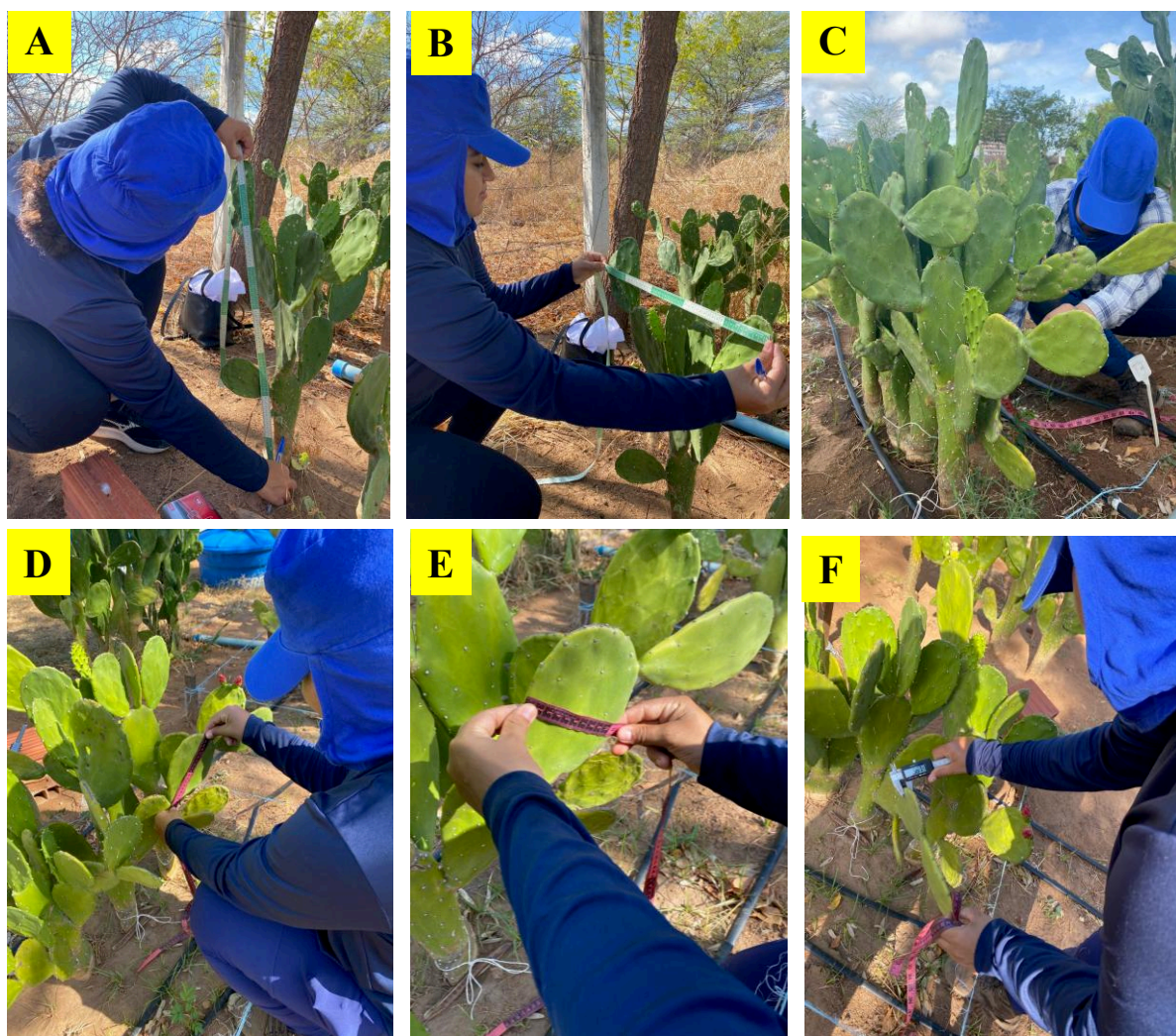


Figura 6. Coleta de dados morfométricos da palma forrageira miúda fertirrigada com água de abastecimento e diluições de efluente aquícola aos 27 meses de cultivo. Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** Avaliação morfométrica com aferição da altura da planta (A); Largura de planta (B); Contagem manual do número e ordens dos cladódios (C), Avaliação morfométrica dos cladódios com aferição do comprimento (D); Diâmetro (E); e Espessura (F).

Para as análises experimentais, foram selecionadas as duas plantas mais vigorosas de cada parcela, removidas para os procedimentos subsequentes. A desinstalação do experimento ocorreu em 20 de dezembro de 2023, seguindo protocolo padronizado para a avaliação final da palma forrageira. Inicialmente, procedeu-se à remoção seletiva dos cladódios secundários, preservando-se, em um primeiro momento, o cladódio basal em virtude de sua conexão com o

sistema radicular. A etapa final envolveu a separação do cladódio basal juntamente com o sistema radicular associado, utilizando lâmina previamente higienizada, de forma a garantir precisão e evitar contaminações.

Todo o material vegetal (cladódios aéreos e sistema radicular) foi transportado para o Laboratório de Análises de Solos, Água e Plantas (LASAP/UFERSA), onde inicialmente se determinou a massa fresca dos componentes aéreos e radiculares em balança analítica de precisão ($\pm 0,01$ g). Em seguida, os cladódios foram acondicionados em casa de vegetação telada (cobertura em sombrite 50%) com ventilação natural por 15 dias, visando à redução gradual do teor de umidade. Durante o período de pré-condicionamento, o material vegetal foi exposto às condições ambientais naturais (temperatura média de 34 ± 4 °C e umidade relativa de $65 \pm 15\%$), permitindo perda de água inicial mais homogênea antes da secagem final.

Para otimizar a secagem, os cladódios foram seccionados longitudinalmente em formato palito com espessura padronizada de 10 ± 2 mm, utilizando lâminas higienizadas. Esse procedimento aumentou a área de superfície de contato, garantindo secagem mais uniforme e eficiente. Todas as amostras foram devidamente identificadas e acondicionadas em sacos de papel kraft. Após a secagem completa em estufa a 65 °C até peso constante, os cladódios foram pesados em balança analítica de precisão para determinação da biomassa seca total (Figura 7).



Figura 7. Coleta e processamento da palma forrageira miúda fertirrigada com água de abastecimento e diluições do efluente aquícola aos 27 meses de cultivo para mensuração de variáveis de produção. Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** Retirada de duas unidades experimentais da parcela (A); Pesagem da massa fresca (B); Secagem em casa de vegetação (C); Cladódios cortados em formato palito (D); Material colocado em sacos de papel e seco em estufa de circulação de ar forçado (E); e Pesagem de material seco, após atingir peso constante (F).

A partir dos dados coletados em cada cladódio por planta, foram estimadas variáveis relacionados à produtividade e ocupação espacial da palma forrageira. A área ocupada por planta (Aop) foi calculada considerando a área de uma elipse ($\text{Área da elipse} = \pi \cdot \text{diâmetro A} \cdot \text{comprimento}$), utilizando as médias de diâmetro (DC) e comprimento (CC) dos cladódios. Esse valor foi multiplicado pelo número de cladódios por planta (NC) e dividido pelo espaçamento disponível ($ep = 0,34 \text{ m}^2$, correspondente a $1,70 \text{ m} \times 0,20 \text{ m}$), conforme a Equação 3 utilizada por Pedrosa *et al.* (2024).

Para estimar o volume fresco de fitomassa (Vf), utilizou-se a mesma abordagem da área da elipse, multiplicando-a pela espessura média dos cladódios (EC) e pelo número de cladódios

por planta (NC), ajustando-se o resultado para hectare com base no número de plantas por hectare ($n_i \approx 29.411,76$ plantas/ha), conforme a Equação 4 empregada por Pedrosa *et al.* (2024). O peso fresco da fitomassa aérea (Pf) foi determinado pelo produto entre o peso da matéria fresca por planta (PMFpa) e o número de plantas por hectare (n_i), conforme a Equação 5 usada por Pedrosa *et al.* (2024).

Para determinar a área individual do cladódio (AC), utilizou-se a expressão proposta por Lucena *et al.* (2021), que considera o comprimento do cladódio (CC) e diâmetro do cladódio (DC) do cladódio, ajustados por um fator de correção de 0,7, conforme a Equação 6. Esse fator de correção foi aplicado para compensar a forma elíptica dos cladódios, garantindo estimativa mais precisa da área real. Posteriormente, a área fotossintética total por planta (AFP) foi calculada multiplicando-se a área individual do cladódio (AC) pelo número total de cladódios por planta (NC), conforme a Equação 7. Essa métrica representa a superfície fotossinteticamente ativa disponível em cada planta, sendo um indicador relevante para avaliar a capacidade produtiva da palma forrageira.

$$A_{op} = \frac{\pi \cdot DC \cdot CC \cdot NC}{ep} \quad (3)$$

$$V_f = \pi \cdot dc \cdot cc \cdot ec \cdot nc \cdot ni \quad (4)$$

$$Pf = PMFpa \cdot ni \quad (5)$$

$$AC = CC \cdot DC \cdot 0,7 \quad (6)$$

$$AFP = AC \cdot NC \quad (7)$$

Em que:

- A_{op} - Área ocupada pela palma, em m² m⁻²;
- DC - Diâmetro médio dos cladódios, em m;
- CC - Comprimento médio dos cladódios, em m;
- NC - Número de cladódios por planta, em m;
- Ep - Espaçamento do plantio (0,34 m²);
- EC - Espessura média dos cladódios, em m;
- V_f - Volume de fitomassa fresca, em m³/ha;

Pf - Peso da matéria fresca, em t/ ha;

PMFpa - Peso da matéria fresca por planta, em t;

ni - Número de plantas por hectare (29.411,76 plantas/ ha);

AC - Área individual do cladódio (cm²); e

AFP - Área fotossintética total por planta, em m²/m².

Análise Estatística

Para avaliação dos efeitos das proporções de efluente aquícola e água de abastecimento nas características da palma forrageira miúda, realizou-se análise multivariada considerando todas as variáveis morfológicas e produtivas mensuradas no fim do período experimental. As variáveis foram organizadas em função das cinco proporções de efluente aquícola e água de abastecimento (0A - 100% água; 25A - 75% água + 25% efluente; 50A - 50% água + 50% efluente; 75A - 25% água + 75% efluente; 100A - 100% efluente), com o objetivo de identificar padrões de resposta da cultura às variações de composição das águas de fertirrigação.

As análises multivariadas foram conduzidas no *software* STATISTICA 14.0 (TIBCO StatisticaTM Software, 2020), seguindo uma abordagem sequencial. Inicialmente, construiu-se uma matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) para avaliar as relações lineares entre todas as variáveis mensuradas. Os coeficientes de correlação foram interpretados conforme Callegari-Jacques (2003): valores entre 0,00-0,30 indicando fraca correlação; 0,30-0,60, correlação moderada; 0,60-0,90, forte correlação; e 0,90-1,00, correlação muito forte.

Posteriormente, aplicou-se a Análise de Componentes Principais (ACP) com o objetivo de reduzir a dimensionalidade dos dados, retendo componentes com autovalores > 1 (critério de Kaiser) e variância acumulada explicada $> 70\%$. Complementando a análise, realizou-se Análise Fatorial com rotação Varimax, considerando cargas fatoriais $> |0,50|$ como significativas. Para visualização dos padrões de agrupamento entre os tratamentos, empregou-se análise de agrupamento hierárquico utilizando distância euclidiana e método de Ward, com corte de dissimilaridade estabelecido em 40%.

A adequação dos dados para análise multivariada foi verificada por meio de teste de esfericidade de Bartlett ($p < 0,001$) e medida KMO ($> 0,60$). Os resultados foram representados graficamente por meio de biplots (ACP) e dendrogramas (análise de agrupamento), facilitando a interpretação das relações entre variáveis morfométricas, produtivas e tratamentos de fertirrigação.

Os dados morfológicos e produtivos da palma forrageira, compreendendo variáveis de crescimento (AP, NC, LP, Aop), dimensões de cladódios (EC, CC, DC, PC), emissão de cladódios por ordem de ramificação (C1^a a C7^a, onde C1^a representa cladódios primários e C7^a a ordem máxima observada), e produção de biomassa (Vf, PMPpa), foram submetidos à análise de variância (ANOVA). Para comparação das médias entre os tratamentos (0A, 25A, 50A, 75A e 100A), utilizou-se o teste de Tukey a 5% de probabilidade, empregando o *software* estatístico SAS (versão 9.4).

RESULTADOS

Matriz de correlação

A matriz de correlação de Pearson revelou padrões significativos no desenvolvimento da palma forrageira miúda sob fertirrigação com proporções de efluente aquícola e água de abastecimento (Tabela 3).

Tabela 3. Matriz de correlação de Pearson entre variáveis morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda sob regime de fertirrigação alternada com água de abastecimento e proporções do efluente aquícola.

Variáveis	AP	NC	EC	CC	DC	PC	LP	Aop	Vf	PMPpa	AC	AFP
AP	1,00											
NC	0,74*	1,00										
EC	0,05	-0,13	1,00									
CC	-0,10	-0,19	0,11	1,00								
DC	0,14	-0,02	0,49	0,80*	1,00							
PC	0,55	0,40	0,37	0,59	0,78*	1,00						
LP	0,81*	0,98*	-0,16	-0,28	-0,09	0,32	1,00					
Aop	0,74*	0,99*	-0,06	-0,09	0,08	0,46	0,96*	1,00				
Vf	0,76*	0,96*	0,06	-0,03	0,15	0,50	0,93*	0,99*	1,00			
PMPpa	0,12	0,37	-0,25	0,39	0,45	0,36	0,32	0,40	0,37	1,00		
AC	0,01	-0,14	0,26	0,97*	0,92*	0,70*	-0,22	-0,03	0,04	0,40	1,00	
AFP	0,74*	0,99*	-0,06	-0,09	0,08	0,46	0,96*	1,00*	0,99*	0,40	-0,03	1,00

Fonte: Autoria própria (2025).

*Valores destacados em negrito são significativos ($p \leq 0,05$).

Nota: AP – Altura de planta, em cm; NC – Número de cladódio; EC – Espessura do cladódio, em mm; CC – Comprimento de cladódio, em cm; DC – Diâmetro de cladódio, em cm; PC – Perímetro de cladódio, em cm; LP – Largura de planta, em cm; Aop – Área ocupada pela palma, em m²/m²; Vf – Volume de fitomassa fresca, em m³/ha; PMFpa - Peso da matéria fresca da palma, em t/ha; AC – Área do cladódio, em cm²; e AFP – Área fotossintética por planta, em m²/m².

Dentre as 20 correlações significativas positivamente, observou-se correlação entre AP e LP ($r = 0,81$), em detrimento de EC ou DC. Observou-se forte correlação positiva ($r = 0,99$) entre o NC e AFP. Além disso, NC correlacionou-se fortemente de maneira positiva com Aop

($r = 0,99$) e LP ($r = 0,98$). As análises revelaram, ainda, correlações significativamente positivas entre NC e Vf ($r = 0,96$), e com a própria AFP ($r = 0,99$).

Por outro lado, a correlação negativa entre o NC e a AC ($r = -0,14$) foi observada. A EC, por sua vez, apresentou fracas correlações com a maioria das variáveis, sendo sua relação mais significativa com o DC ($r = 0,49$). Sua baixa associação a características de crescimento vegetativo, como AP ($r = 0,05$) e NC ($r = -0,13$), foi verificada.

Adicionalmente, observou-se correlação fortemente positiva entre AC e CC ($r = 0,97$), e entre AC e DC ($r = 0,92$). Apesar da alternância de água de abastecimento e proporções de efluente, PC e DC mantiveram correlação expressiva ($r = 0,78$). Nota-se correlação fortemente positiva entre LP e AFP ($r = 0,96$). A correlação entre Aop e AFP foi fortemente positiva ($r = 1,00$). Ainda nesse contexto, destaca-se a correlação entre AFP e Vf ($r = 0,99$).

Agrupamento

O dendrograma obtido da análise de agrupamento revelou dissimilaridade acentuada entre os tratamentos aplicados no primeiro (A1) e segundo (A2) anos de cultivo, formando dois agrupamentos distintos (G1 e G2) (Figura 8).

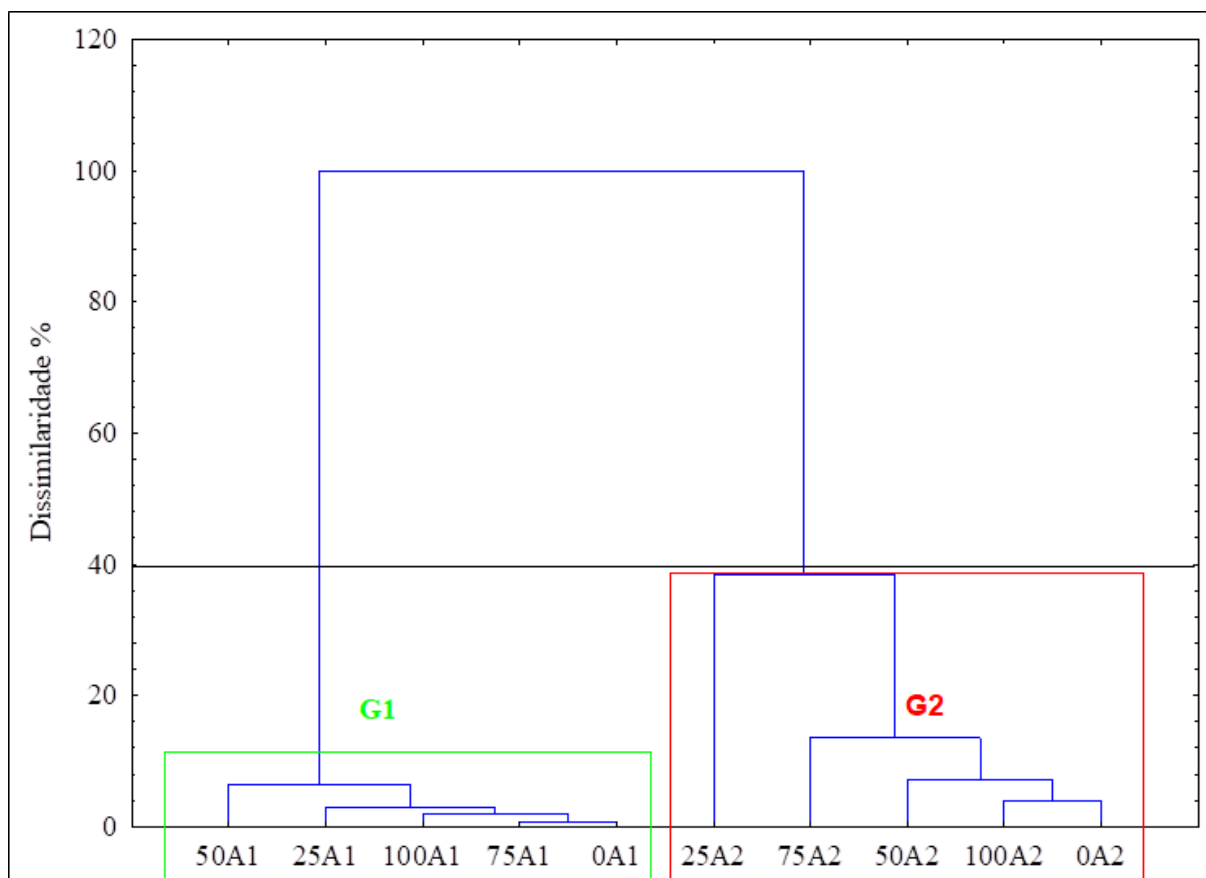


Figura 8. Dendrograma horizontal da resposta da palma forrageira à aplicação de efluente da aquicultura em dois anos de cultivo da palma forrageira miúda. Fonte: Autoria própria (2025).
Nota: G1 – Grupo 1; G2 – Grupo 2; A1– Primeiro ano de cultivo (Pedrosa *et al.*, 2024); A2 – Segundo ano de cultivo; 25, 50, 75 e 100% – Proporções de efluente da aquicultura usadas na irrigação.

O agrupamento G1 incluiu todos os tratamentos de A1, independentemente da diluição do efluente. Em contraste, o agrupamento G2 agrupou exclusivamente os tratamentos de A2, apresentando maior heterogeneidade interna.

A análise revelou que as respostas da palma forrageira miúda não seguiram um gradiente linear em função da concentração de efluente, destacando a relevância do tratamento com 25% de efluente. No primeiro ano (G1), a proximidade entre os tratamentos 75A1 e 100A1 foi observada, ao passo que o tratamento 25A1 se posicionou no mesmo agrupamento. Os dados do segundo ano de cultivo (G2) revelaram maior dispersão entre tratamentos.

Análise fatorial

A análise fatorial revelou que três fatores explicaram conjuntamente 91,47% da variabilidade total dos dados, demonstrando elevado poder explicativo do modelo (Tabela 4).

Tabela 4. Análise fatorial dos componentes principais para características morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda irrigada com proporções de efluente aquícola.

Variáveis	Fator 1	Fator 2	Fator 3
AP	0,83*	0,06	-0,23
NC	0,98*	-0,05	0,11
EC	-0,04	0,29	-0,87*
CC	-0,16	0,93*	0,1
DC	0,05	0,95*	-0,20
PC	0,46	0,77*	-0,27
LP	0,98*	-0,14	0,09
Aop	0,98*	0,05	0,07
Vf	0,97*	0,12	-0,03
PMFpa	0,34	0,52	0,62
AC	-0,09	0,98*	-0,02
AFP	0,98*	0,05	0,0
Autovalores	5,97	3,68	1,32
% Variância	49,79	30,71	10,97
% Variância Acumulada	49,79	80,50	91,47

Fonte: Autoria própria (2025).

* Eixos fatoriais rotacionados pelo método Varimax; Cargas fatoriais $\geq 0,7$ foram consideradas significativas para fins de interpretação.

Nota: AP – Altura de planta, em cm; NC – Número de cladódio; EC – Espessura do cladódio, mm; CC – Comprimento de cladódio, cm; DC – Diâmetro de cladódio, cm; PC – perímetro de cladódio, cm; LP – Largura de planta em cm; Aop – Área ocupada pela palma, m²/m²; Vf – Volume de fitomassa fresca, em m³/ha; PMFpa – Peso da matéria fresca da palma, em t; AC – Área do cladódio, em cm²; AFP – Área fotossintética por planta, em m²; e F1, F2 e F3 – Fatores 1, 2 e 3.

O primeiro fator, responsável por quase metade da variabilidade total, agrupou fortemente variáveis relacionadas à morfometria da planta e capacidade fotossintética. A forte associação entre estas variáveis evidencia que o crescimento vertical, a produção de cladódios e a expansão da área foliar são processos interdependentes que constituem o principal eixo de variação morfológica da cultura.

O segundo fator reuniu características dimensionais dos cladódios. Este agrupamento revela uma dimensão estrutural distinta, relacionada ao desenvolvimento individual dos cladódios. A consistência destas correlações sugere que o crescimento dos cladódios segue padrões geométricos previsíveis, com proporções mantidas independentemente do tratamento aplicado. Esta dimensão estrutural mostra-se menos influenciada pelas variações dos regimes de efluente do que as características agrupadas no Fator 1. O terceiro fator apresentou associação negativa exclusiva com a EC (-0.87), revelando um padrão distinto das demais variáveis.

Análise dos Componentes Principais (ACP)

A ACP gerou uma representação gráfica das variáveis por meio de vetores (Figura 9A). Os dois primeiros fatores (F1 e F2) explicaram, juntos, 80,51% da variância total dos dados,

com contribuições individuais de 49,80% e 30,71%, respectivamente. A importância de cada variável é mostrada por sua proximidade da borda do círculo de correlações, ao passo que a direção e o sentido dos vetores revelam correlações positivas ou opostas entre elas. A Figura 9B ilustra a distribuição dos tratamentos (proporções de efluente e anos de cultivo) neste mesmo espaço bidimensional definido por F1 e F2.

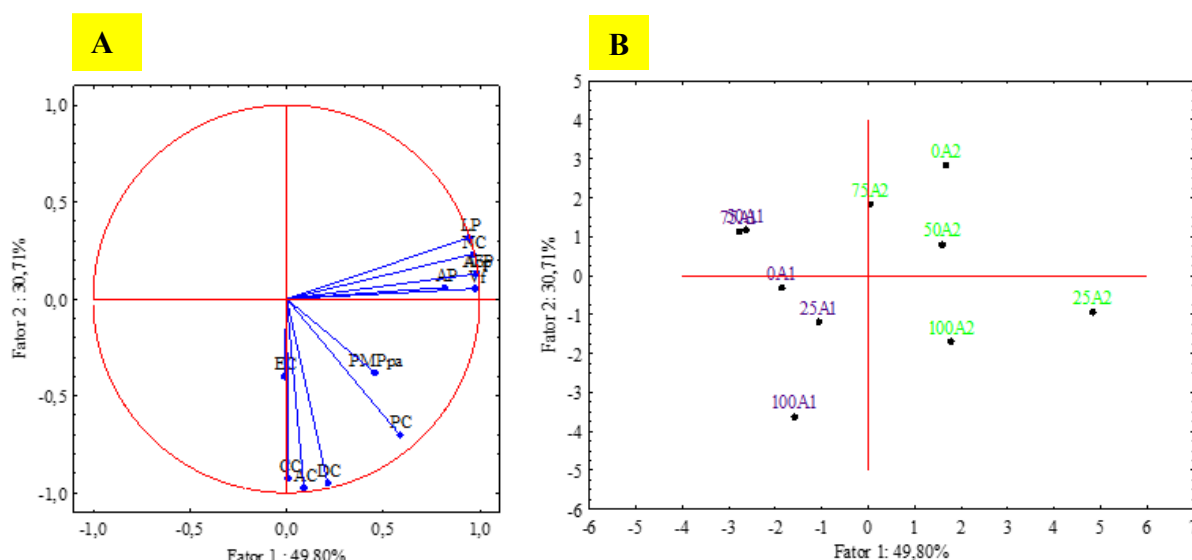


Figura 9. Círculo de correlações para o fator 1 x fator 2, distribuição das variáveis (A) e distribuição das proporções de efluente de aquicultura e água de abastecimento no decorrer dos dois ciclos de cultivo da palma (B). Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** AP – Altura de planta, em cm; NC – Número de cladódio; EC – Espessura do cladódio, em mm; CC – Comprimento de cladódio, em cm; DC – Diâmetro de cladódio, em cm; PC – Perímetro de cladódio, em cm; LP – Largura de planta, em cm; Aop – Área ocupada pela palma, em m²/m²; Vf – Volume de fitomassa fresca, em m³/ha; PMFpa – Peso da matéria fresca da palma, em t/ha; AC – Área do cladódio, em cm²; AFP – Área fotossintética por planta, em m²/m²; A1 – Primeiro ano de cultivo (Pedrosa *et al.*, 2024); A2 – Segundo ano de cultivo; 25, 50, 75 e 100% – Proporções de efluente aquícola usada na de irrigação da palma miúda.

Na Figura 9A, observa-se que a maioria das variáveis morfológicas e produtivas se estabelece na horizontal representando o F1. As variáveis mais influentes nesse fator, por estarem mais próximas da borda do círculo de correlação, foram: NC, LP, Aop, Vf e AFP. O Fator 2, embora com menor contribuição relativa, destaca variações complementares ao padrão geral de crescimento, especialmente associadas AC, DC e CC.

A distribuição dos tratamentos (Figura 9B) revelou padrões distintos de agrupamento, tanto em função do ano de cultivo quanto das proporções do efluente aplicado. De modo geral, os tratamentos do segundo ano de cultivo (A2) se concentraram nos quadrantes positivos de F1 e F2. Destaca-se a diluição de 25% de efluente (25A2), que promoveu incrementos de 32% no número de cladódios (NC) e 28% na área fotossintética (AFP) em comparação ao controle, superando inclusive proporções mais elevadas de efluente. Por sua vez, os tratamentos do

primeiro ano, como 50A1 e 75A1, apresentaram menor correlação com os fatores de crescimento, evidenciando desempenho inferior. É ainda relevante destacar o posicionamento do tratamento 0A2, correspondente à irrigação exclusivamente com água de abastecimento no segundo ano, que se apresentou afastado dos tratamentos com efluente.

A interação entre o Fator 2 (30,71%) e o Fator 3 (10,97%) foi responsável por 41,68% da explicação da variância total, conforme ilustrado no círculo de correlações da Figura 10.

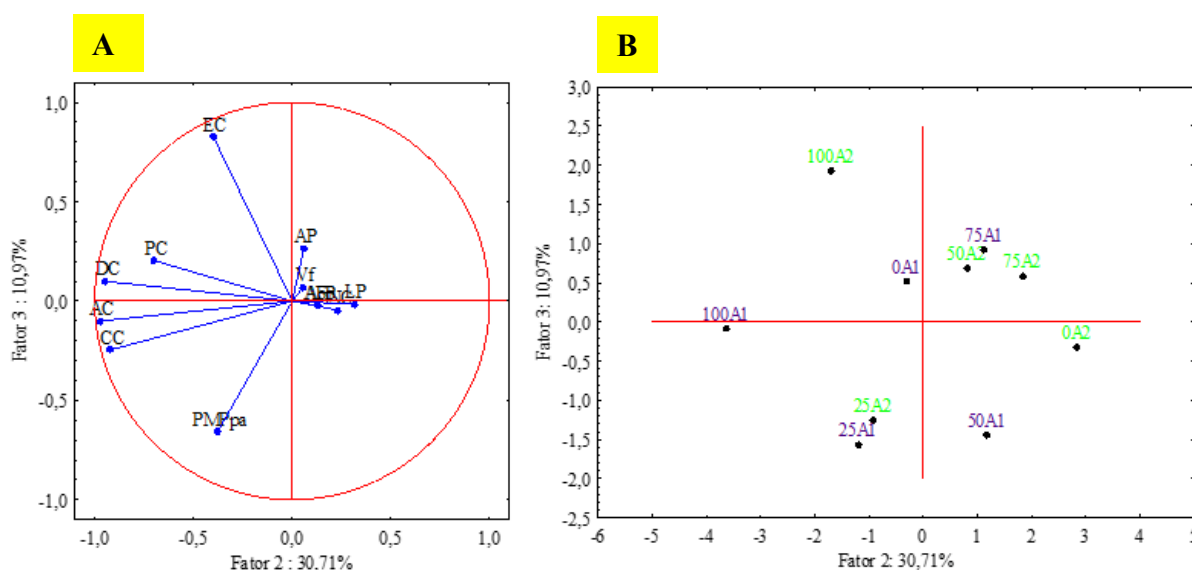


Figura 10. Círculo de correlações para o fator 2 x fator 3, distribuição das variáveis (A) e distribuição das proporções de efluente de aquicultura e água de abastecimento no decorrer dos dois ciclos de cultivo da palma (B). Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** AP – Altura de planta, em cm; NC – Número de cladódio; EC – Espessura do cladódio, em mm; CC – Comprimento de cladódio, em cm; DC – Diâmetro de cladódio, em cm; PC – Perímetro de cladódio, em cm; LP – Largura de planta, em cm; Aop – Área ocupada pela palma, em m²/m²; Vf – Volume de fitomassa fresca, em m³/ha; PMFpa – Peso da matéria fresca da palma, em t/ha; AC – Área do cladódio, em cm²; AFP – Área fotossintética por planta, em m²/m²; A1 – Primeiro ano de cultivo (Pedrosa *et al.*, 2024); A2 – Segundo ano de cultivo; 25, 50, 75 e 100% – Proporções de efluente aquícola usada na de irrigação da palma miúda.

Apesar do baixo percentual explicativo atribuído à alta concentração de variáveis no centro do gráfico, evidenciando sua pouca influência na composição desses dois fatores, a análise de componentes principais permitiu identificar os principais padrões de variação nos dados, revelando efeitos marcantes tanto do tempo de cultivo quanto das proporções de efluente aquícola aplicadas na palma forrageira miúda.

No círculo de correlação (10A), observa-se que o Fator 2 foi fortemente influenciado pelo tempo de cultivo, destacando-se como o principal eixo de separação entre os tratamentos de um e dois anos. Essa distribuição evidencia que as variáveis associadas ao crescimento

morfológico AC, DC, CC e PC exibem maior contribuição neste eixo e foram mais expressivas no primeiro ano de cultivo.

Por sua vez, o Fator 3 apresenta apenas EC, evidenciando que, dentre todas as variáveis consideradas, a espessura do cladódio foi a única com importância expressiva na formação desse fator. Fazendo correlação da EC com condutividade elétrica (CE) obtida, pode-se notar que os dados revelaram tendência geral de redução da espessura dos cladódios com o aumento da CE da água ($0,47$ a $4,74$ dS m^{-1}) e do solo ($0,11 - 0,46$ dS m^{-1} a $0-20$ cm; $0,06 - 0,26$ dS m^{-1} a $20-40$ cm), exceto no 100A2 (CE = $4,74$ dS m^{-1}), que apresentou maior espessura, sugerindo mecanismos de tolerância à salinidade em condições extremas. A baixa contribuição da espessura à variância total (10,97%) foi observada.

Teste de médias

Os diferentes níveis de efluente aquícola influenciaram significativamente os atributos morfológicos e produtivos da palma forrageira miúda (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Valores médios com desvio padrão dos atributos morfológicos e produtivos da palma forrageira miúda (*Nopalea cochenillifera*) fertirrigada com diferentes proporções de efluente

Atributos	Tratamentos				
	0A	25A	50A	75A	100A
AP (cm)	$72,93 \pm 4,20^b$	$70,12 \pm 3,28^b$	$74,57 \pm 4,15^a$	$68,86 \pm 8,30^c$	$77,65 \pm 7,99^a$
NC	$21,30 \pm 3,07^b$	$27,50 \pm 1,26^a$	$18,77 \pm 1,08^c$	$16,20 \pm 2,46^d$	$17,77 \pm 4,62^a$
EC (mm)	$11,94 \pm 0,22^b$	$12,36 \pm 1,07^a$	$17,77 \pm 4,62^a$	$12,43 \pm 1,30^b$	$13,62 \pm 2,33^b$
CC (cm)	$15,51 \pm 2,01^a$	$17,39 \pm 0,58^a$	$16,56 \pm 1,97^a$	$16,28 \pm 1,59^a$	$16,92 \pm 1,88^a$
DC (cm)	$7,95 \pm 0,09^a$	$8,78 \pm 0,27^a$	$8,08 \pm 0,60^a$	$7,90 \pm 0,72^a$	$8,42 \pm 1,05^a$
PC (cm)	$17,52 \pm 1,74^a$	$17,97 \pm 0,59^a$	$17,56 \pm 1,50^a$	$17,81 \pm 1,10^a$	$18,01 \pm 2,28^a$
LP (cm)	$67,79 \pm 9,12^b$	$73,78 \pm 4,16^a$	$63,99 \pm 9,24^c$	$57,20 \pm 3,91^d$	$60,77 \pm 4,16^{cd}$
Aop ($m^2 m^{-2}$)	$2,52 \pm 1,54^c$	$3,65 \pm 1,57^a$	$2,44 \pm 1,83^c$	$2,03 \pm 1,74^d$	$2,28 \pm 6,92^{cd}$
Vf ($m^3 ha^{-1}$)	$28,01 \pm 16,03^c$	$44,61 \pm 1,78^a$	$33,37 \pm 30,43^b$	$23,62 \pm 14,41^d$	$30,08 \pm 11,26^c$
PMFpa ($t ha^{-1}$)	$16934,98 \pm 98,87^c$	$24308,49 \pm 94,48^a$	$15527,49 \pm 98,74^d$	$12788,48 \pm 80,34^e$	$16127,66 \pm 66,40^{cd}$

aquícola.

Fonte: Autoria própria (2025).

* As letras (a, b, c, d) após os valores na seção de resultados indicam grupos estatisticamente homogêneos pelo teste de Tukey ($p > 0,05$). Valores compartilhando a mesma letra dentro de cada coluna não diferem significativamente entre si.

Nota: AP – Altura de planta, em cm; NC – Número de cladódio; EC – Espessura do cladódio, em mm; CC – Comprimento de cladódio, em cm; DC – Diâmetro de cladódio, em cm; PC – Perímetro de cladódio, em cm; LP – Largura de planta, em cm; Aop – Área ocupada pela palma, em m^2/m^2 ; Vf – Volume de fitomassa fresca, em m^3/ha ; PMFpa – Peso da matéria fresca da palma, em t/ha . Tratamentos: 0A (100% água), 25A (25% efluente), 50A (50% efluente), 75A (75% efluente), 100A (100% efluente).

O tratamento 25A promoveu os melhores resultados, destacando-se com o maior NC (27,50), Aop ($3,65 m^2 m^{-2}$), Vf ($44,61 m^3 ha^{-1}$) e PMFpa ($24308,49 t ha^{-1}$). Este tratamento

também induziu a formação de cladódios até a sétima ordem, demonstrando maior complexidade estrutural.

O tratamento 0A apresentou valores intermediários na maioria das variáveis, ao passo que 50A, 75A e 100A mostraram desempenho inferior em relação ao NC e PMFpa. Especificamente, 75A registrou os menores valores para NC (16,20), Aop ($2,03 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$) e PMFpa ($12788,48 \text{ t ha}^{-1}$).

Quanto às dimensões dos cladódios, não houve diferenças significativas entre os tratamentos para CC, DC e PC. No entanto, para EC os tratamentos 25A e 50A apresentaram os maiores valores (12,36 mm e 17,77 mm, respectivamente).

Tabela 6. Emissão de cladódios por ordem (unidades) de palma forrageira miúda fertirrigada

Ordem de cladódios	Tratamentos				
	0A	25A	50A	75A	100A
C1 ^a	$2,20 \pm 0,09^a$	$2,70 \pm 0,06^a$	$1,89 \pm 0,05^b$	$2,10 \pm 0,42^{ab}$	$2,10 \pm 1,08^{ab}$
C2 ^a	$4,70 \pm 1,64^b$	$7,50 \pm 1,27^a$	$4,40 \pm 1,19^b$	$4,70 \pm 1,64^b$	$4,30 \pm 1,68^b$
C3 ^a	$8,50 \pm 5,43^a$	$9,20 \pm 3,40^a$	$6,70 \pm 9,34^b$	$4,50 \pm 3,04^b$	$8,00 \pm 2,15^{ab}$
C4 ^a	$4,50 \pm 4,72^a$	$5,40 \pm 4,16^a$	$3,70 \pm 4,28^a$	$3,30 \pm 6,04^a$	$2,30 \pm 1,68^a$
C5 ^a	$1,40 \pm 2,10^a$	$2,10 \pm 2,46^a$	$0,60 \pm 1,08^a$	$1,40 \pm 2,86^a$	$0,00 \pm 0,00^a$
C6 ^a	$0,00 \pm 0,00^a$	$0,00 \pm 0,22^a$	$0,10 \pm 0,22^a$	$0,00 \pm 0,00^a$	$0,00 \pm 0,00^a$
C7 ^a	$0,00 \pm 0,00^a$	$0,10 \pm 0,22^a$	$0,00 \pm 0,00^a$	$0,00 \pm 0,00^a$	$0,00 \pm 0,00^a$

com efluente aquícola após 27 de transplantio.

Fonte: Autoria própria (2025).

* Médias $\pm$ desvio padrão seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Nota: Tratamentos: 0A (100% água), 25A (25% efluente), 50A (50% efluente), 75A (75% efluente), 100A (100% efluente). C1^a - C7^a: Cladódios de 1^a a 7^a ordem.

DISCUSSÃO

Os resultados sugerem que a fertirrigação com efluente favoreceu o desenvolvimento lateral dos cladódios, provavelmente devido à maior disponibilidade de macronutrientes como N, P e K (Tabela 3), os quais tendem a ser alocados em estruturas fotossintéticas mais ativas e expandidas. Resultados corroboram com Lemos *et al.* (2018), que estudaram os efeitos da fertirrigação com esgoto doméstico tratado na palma orelha-de-elefante mexicana (*Opuntia Tuna L.* Mill).

O Incremento na ramificação, ao longo dos 27 meses após o transplantio da palma miúda, resultou em maior capacidade fotossintética da planta. Este comportamento sugere que o NC é um excelente preditor da eficiência fisiológica, uma vez que o aumento do número de estruturas fotossintéticas amplia a superfície de interceptação luminosa, favorecendo o acúmulo de biomassa. Este achado corrobora estudo anterior destacando a importância da área foliar para

interceptação luminosa e acúmulo de biomassa de cactáceas forrageiras em regiões semiáridas (Santos *et al.*, 2024).

Os achados sugerem que cladódios mais largos não apenas favorecem o crescimento horizontal da planta, como também promovem um ambiente morfológico propício à emissão de novos cladódios. Esses achados reforçam a morfologia dos cladódios como determinante da biometria vegetal e sua capacidade de exploração do espaço (Barbosa *et al.*, 2018).

A forte correlação positiva entre NC, Aop e Vf sugere que o uso de efluente da aquicultura, ainda que diluído, não restringiu o crescimento vegetativo da palma forrageira. Pelo contrário, o fornecimento adicional de nutrientes, especialmente nitrogênio e fósforo, presentes no efluente pode ter estimulado a brotação e a expansão da biomassa. Corroborando esses achados, Azevedo Júnior *et al.* (2019) demonstraram que a fertirrigação com efluente promove aumento significativo da taxa de emissão de cladódios na palma forrageira, reforçando a relação entre disponibilidade nutricional e desenvolvimento vegetativo.

A correlação negativa entre o NC e a AC sugere possível efeito compensatório na alocação de recursos. Plantas mais ramificadas tendem a desenvolver cladódios menores individualmente, fenômeno comum nas espécies adaptadas ao semiárido, que priorizam a multiplicação de estruturas fotossintéticas em detrimento do seu tamanho individual. Tal padrão reforça a existência de relação inversamente proporcional entre o NC e AC, mesmo sob fertirrigação alternada, evidenciando alocação estratégica de recursos sob influência de fontes orgânicas de nutrientes, cuja liberação é gradual (Barbosa *et al.*, 2017).

A baixa associação da EC a características de crescimento vegetativo sugere que a espessura é um traço conservativo, predominantemente de natureza genética e pouco sensível às condições hídricas ou nutricionais. Resultados similares foram descritos por Freire *et al.* (2018) com cultivos sob estresse salino. Por outro lado, esse achado contrasta com estudo anterior, sugerindo que cladódios mais espessos contribuem para a retenção hídrica e, consequentemente, para resiliência da planta em ambientes áridos (Pereira *et al.*, 2021).

A correlação fortemente positiva entre AC e CC e entre AC e DC mostra que a expansão longitudinal do cladódio está fortemente associada ao aumento da área superficial disponível para trocas gasosas e armazenamento de água. Esse padrão é particularmente relevante nas cactáceas adaptadas ao semiárido, nas quais o comprimento do cladódio se relaciona positivamente à eficiência de assimilação de carbono (Araújo Júnior *et al.*, 2021).

A manutenção dessa correlação da correlação entre PC e DC indica que o efluente, mesmo diluído, não comprometeu a forma e o desenvolvimento estrutural dos cladódios,

corroborando estudo prévio que avaliou o impacto de águas residuárias no desenvolvimento da cultura (Araújo Júnior *et al.*, 2022).

A correlação fortemente positiva entre LP e AFP indica que cladódios mais largos contribuem substancialmente para a área fotossintética total da planta. Essa associação fortalece a compreensão de que a morfologia lateral do cladódio desempenha papel central na funcionalidade fisiológica da cultura e, portanto, deve ser considerada critério de seleção nos programas de melhoramento visando à produção em ambientes irrigados com fontes alternativas de água. Lima *et al.* (2018) também descreveram essa relação, destacando a influência da morfologia lateral do cladódio na eficiência fotossintética.

A correlação entre Aop e AFP, dado o compartilhamento das variáveis com NC, LP e Vf, reforça a coesão entre a estrutura vegetativa e a produtividade da planta. O incremento da área fotossintética se traduz, diretamente, em maior produção de fitomassa, validando a funcionalidade fisiológica da palma forrageira sob fertirrigação com efluente. Esses resultados corroboram Feraz *et al.* (2019), demonstrando que a expansão da área cladodial na palma forrageira está diretamente associada ao aumento da capacidade fotossintética e, consequentemente, à produtividade de biomassa.

A segregação observada no dendrograma evidencia influência temporal da fertirrigação com efluente aquícola no desempenho da palma forrageira miúda, sendo a duração do cultivo fator mais determinante do que a concentração do efluente (0, 25, 50, 75 e 100%) (Figura 8). Essa separação temporal sugere efeitos cumulativos do uso contínuo do efluente, corroborando estudos recentes sobre fertirrigação com águas residuárias urbanas em condições semiáridas (Lima *et al.*, 2020).

A uniformidade no agrupamento G1, que incluiu todos os tratamentos do primeiro ano, pode ser atribuída à tolerância inerente da cultura à seca e sua resiliência à qualidade marginal da água, mascarando potenciais efeitos de curto prazo da composição do efluente. A maior heterogeneidade dentro de G2 provavelmente reflete efeitos cumulativos, que se tornaram mais pronunciados no segundo ano, indicando adaptações fisiológicas ou edáficas divergentes ao longo do tempo.

A ausência de padrão hierárquico claro entre as proporções sugere que baixas dosagens (como 25%) podem desencadear efeitos fisiológicos ou edáficos comparáveis aos de proporções mais elevadas. No primeiro ano (G1), a proximidade entre os tratamentos 75A1 e 100A1 indica que os incrementos acima de 75% não resultaram em respostas significativamente distintas, ao passo que o posicionamento do tratamento 25A1 no mesmo agrupamento sugere que esta dosagem já foi suficiente para induzir efeitos biológicos relevantes. Os dados do

segundo ano de cultivo (G2) revelaram maior dispersão entre tratamentos, indicando crescente complexidade nas interações planta-solo-efluente.

Estes resultados corroboram com os achados de Pedrosa *et al.* (2024), que identificaram a proporção de 25% de efluente aquícola como o ponto ótimo para manter a produtividade da palma forrageira miúda sem prejudicar seu balanço hídrico, ao passo que proporções mais elevadas comprometeram o desenvolvimento vegetativo. A consistência entre os estudos confirma que esta proporção equilibra a eficiência no aproveitamento nutricional do efluente, controle dos riscos de salinização do solo e preservação da homeostase fisiológica da cultura.

O padrão observado no primeiro fator sugere que estas características estão intimamente relacionadas e respondem de forma coordenada aos tratamentos com efluente. Estes resultados corroboram as observações de Barbosa *et al.* (2018), confirmando que a relação funcional entre ramificação e metabolismo CAM representa uma estratégia fisiológica conservada em palma forrageira, permitindo sua plasticidade morfológica em resposta a gradientes de disponibilidade de recursos.

Araújo Júnior *et al.* (2021) destacam que os atributos morfológicos da palma forrageira representam um eixo estrutural conservado, menos sensível a estresses ambientais do que variáveis fisiológicas ou produtivas. Essa estabilidade dimensional indica mecanismos genético-fisiológicos robustos que mantêm a arquitetura dos cladódios mesmo sob condições adversas, evidenciando a resiliência da cultura em sistemas agrícolas com limitações abióticas.

Os resultados deste estudo corroboram com os achados de Freire *et al.* (2018), demonstrando que a EC apresenta padrão conservador de resposta ao estresse salino, porém com influência limitada no desempenho geral da palma forrageira. Em ambos os trabalhos, a EC mostrou-se sensível às condições adversas, mas manteve-se como característica secundária, sem impacto significativo nos parâmetros produtivos e fisiológicos principais. Essa consistência entre os estudos realizados com diferentes fontes de salinidade sugere que a variação da EC representa uma resposta marginal e pouco determinante na adaptação global da cultura.

Os resultados da Figura 9A sugerem que o F1 está associado ao desempenho agrônomico geral da palma forrageira miúda. Tais atributos refletem diretamente o acúmulo de biomassa e a conformação da planta, sendo indicativos robustos do seu desempenho produtivo. O Fator 2 sugere influência de características morfológicas específicas em determinados tratamentos.

A distribuição dos tratamentos refletiu melhor desempenho agrônomico dos tratamentos do segundo ano (A2) em comparação aos do primeiro ano (A1). Este resultado evidencia que a

proporção de 25% representa o ponto ótimo entre eficiência produtiva e sustentabilidade ambiental no cultivo da palma forrageira em condições semiáridas.

O comportamento dos tratamentos do primeiro ano pode estar relacionado aos efeitos acumulativos do manejo da irrigação com efluente, à adaptação progressiva da cultura às condições impostas ou à maior maturidade fisiológica das plantas no segundo ciclo de cultivo. O desempenho inferior do tratamento 0A2 reforça o papel do efluente da aquicultura como fonte suplementar de nutrientes, contribuindo para o crescimento e o acúmulo de biomassa da palma.

A melhoria dos parâmetros morfológicos e produtivos da palma forrageira miúda no segundo ano de irrigação com efluente da aquicultura resulta de mecanismos adaptativos desenvolvidos pela planta, incluindo acúmulo de osmólitos, otimização da eficiência no uso da água e ajustes fisiológicos que mantiveram o equilíbrio hídrico. Esses achados corroboram com Fonseca *et al.* (2019), que destacam a alta tolerância da palma forrageira ao estresse por meio de mecanismos fisiológicos, como o acúmulo de compostos osmorreguladores (prolina e açúcares solúveis), ajustes osmóticos e aumento da eficiência no uso da água, devido à menor transpiração e melhor absorção hídrica. Essa adaptabilidade também foi observada por Pereira *et al.* (2021), os quais, estudando o crescimento de cultivares de palma irrigadas sob diferentes níveis de salinidade no semiárido, constataram que a cultura apresenta tolerância ao estresse salino e mantém crescimento satisfatório em ambientes com alta condutividade elétrica.

A predominância das variáveis morfológicas no primeiro ano sugere resposta mais vigorosa da planta à fertirrigação com efluente durante a fase inicial de desenvolvimento, possivelmente associada a uma maior eficiência na absorção de nutrientes e menor competição por recursos endógenos. Tais resultados indicam que a resposta morfológica da palma forrageira miúda ao uso de efluente é fortemente condicionada pela fase fenológica da planta, com destaque para o primeiro ano de estabelecimento. Esses resultados corroboram com Santos *et al.* (2024) que constataram variáveis morfológicas apontando características estruturais relevantes da planta forrageira diretamente associadas à sua capacidade de acúmulo de água e reservas, essenciais à sua adaptação em ambientes semiáridos.

O comportamento do tratamento 100A2, que apresentou maior espessura sob alta condutividade elétrica, sugere mecanismos de tolerância à salinidade em condições extremas. A baixa contribuição da espessura à variância total confirma a estabilidade morfológica da palma forrageira miúda frente ao estresse salino, alinhando-se com estudos que destacam sua plasticidade fisiológica. Essa resposta não linear em altas salinidades ($CE > 3 \text{ dS m}^{-1}$) pode estar associada aos ajustes osmóticos e acúmulo de compostos orgânicos solúveis, como

reportado para cactáceas em condições semiáridas. Ramos *et al.* (2021) constataram que a espessura do cladódio foi pouco influente na variabilidade morfológica da palma forrageira, sugerindo possível efeito cumulativo do manejo nutricional ao longo do tempo.

Quando aplicado o teste de média, os resultados demonstram que a concentração de 25% de efluente aquícola (25A) representa a proporção ideal para a fertirrigação da palma forrageira miúda no semiárido. O desempenho significativamente superior deste tratamento, evidenciado pelos maiores valores de NC, Aop, Vf e PMFpa, pode ser atribuído ao equilíbrio entre o aporte nutricional e a tolerância ao estresse salino. O efluente aquícola, rico em nitrogênio, fósforo e potássio, atuou como fonte de nutrientes essenciais para o metabolismo CAM da palma forrageira, conforme observado por Barbosa *et al.* (2017) em estudos com plantas forrageiras.

A resposta diferencial aos tratamentos evidencia a importância do manejo adequado da concentração de efluentes. Enquanto 25A proporcionou condições ótimas para o desenvolvimento vegetativo, os tratamentos com maiores concentrações (75A e 100A) apresentaram redução significativa do crescimento, possivelmente em virtude do aumento da condutividade elétrica da água de irrigação, que variou de 0,47 para 4,74 dS m⁻¹. Este padrão corrobora com Lucena *et al.* (2021), os quais relatam que concentrações elevadas de efluentes podem levar ao acúmulo de sais no solo, prejudicando o desenvolvimento das plantas.

A promoção de cladódios até a 7ª ordem indica maior complexidade estrutural e eficiência metabólica, de modo que a maior diversidade nas ordens de cladódios ocorre quando as condições ambientais são favoráveis ao crescimento, o que explica a superioridade deste tratamento nos parâmetros de área fotossintética e produção de biomassa. Esses resultados estão em consonância com pesquisas anteriores em *Opuntia spp.*, mostrando que plantas com maior ramificação apresentam maior eficiência no metabolismo CAM e melhor utilização de recursos hídricos e nutricionais (Ramos *et al.*, 2021).

A estabilidade das dimensões dos cladódios (comprimento, diâmetro e perímetro) em todos os tratamentos reforça a resiliência morfológica da palma forrageira, característica fundamental para sua adaptação às condições semiáridas. Esta plasticidade fenotípica, também reportada por Pereira *et al.* (2021), confere à cultura a capacidade de manter suas funções fisiológicas mesmo sob condições adversas.

Do ponto de vista prático, a aplicação de 25% de efluente aquícola apresenta-se como alternativa sustentável para agricultores do semiárido, permitindo o reaproveitamento de nutrientes e a redução do descarte de efluentes na aquicultura. Esta prática promove a integração

de sistemas produtivos e otimiza o uso de recursos hídricos escassos na região, contribuindo para a segurança alimentar e sustentabilidade dos agroecossistemas locais.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fertirrigação com 25% de efluente aquícola estabeleceu-se como a proporção ideal para o cultivo da palma forrageira miúda no semiárido, promovendo os maiores valores de produtividade e desenvolvimento morfofisiológico. Esta dosagem específica se mostrou a mais eficiente para incrementar o número de cladódios e a área fotossintética, superando claramente tanto o cultivo exclusivo com água quanto as concentrações mais elevadas de efluente.

Os resultados revelaram que concentrações superiores a 50% de efluente não proporcionaram ganhos adicionais significativos no desenvolvimento vegetativo, com respostas morfofisiológicas similares entre si, porém inferiores às obtidas com 25% de efluente. A espessura dos cladódios manteve-se notavelmente estável em todas as condições de cultivo, reforçando a robustez desta característica morfológica diante das variações no manejo da fertirrigação.

A estratégia de substituição de 25% da água convencional por efluente aquícola consolida-se, portanto, como prática técnica e ambientalmente sustentável para os sistemas de produção do semiárido. Esta recomendação oferece protocolo eficiente para produtores, equilibrando maximização da produtividade e reuso responsável de efluentes na agricultura familiar.

REFERÊNCIAS

AHMAD, A. *et al.* Aquaculture industry: Supply and demand, best practices, effluent and its current issues and treatment technology. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 287, p. 112271, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112271>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ALLEN, R. G. *et al.* Evapotranspiration del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. **Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO)**, [s. l.], n. 56, 2006. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122621/records/6472496908fd68d54600a223>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ALMEIDA, A. S. G. Água: essencial para vida humana e a saúde da população. **Anais do Encontro Internacional e Nacional de Política Social**, [s. l.], v. 1, n. 1, 2024. Disponível em: <https://periodicos.ufes.br/einps/article/view/45828>. Acesso em: 15 abr. 2025.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. *et al.* Phenophases, morphophysiological indices and cutting time in clones of the forage cacti under controlled water regimes in a semiarid environment. **Journal of Arid Environments**, [s. l.], v. 190, p. 104510, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0140196321000768>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. *et al.* The association between morphological characteristics and yield in forage cactus clones varies according to water regimes: a principal component analysis. **Journal of the Professional Association for Cactus Development**, [s. l.], v. 24, p. 83–95, 2022. Disponível em: <https://www.jpacd.org/jpacd/article/view/475>. Acesso em: 14 abr. 2025.

AZEVEDO JUNIOR, M. S. *et al.* Produtividade e teor de nutrientes em palma forrageira irrigada com efluente de esgoto doméstico. **Irriga**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 830–842, 2019. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/3552>. Acesso em: 14 abr. 2025.

BARBOSA, M. L. *et al.* Association of morphological and water factors with irrigated forage cactus yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 600–605, 2017. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1415-43662017000900600&lng=en&tlng=en. Acesso em: 14 abr. 2025.

BARBOSA, M. L. *et al.* The influence of cladode morphology on the canopy formation of forage cactus plants. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 31, p. 180–190, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/q73BRQdMf96BbdMbV3nSxkq/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: Princípios e Aplicações**. 1ª edição. Porto Alegre, RS: Artmed, 2003.

COSTA, D. O. *et al.* Características químicas del suelo irrigado con agua producida tratada y agua subterránea. **Dyna**, [s. l.], v. 86, n. 210, p. 143–149, 2019. Disponível em: <https://revistas.unal.edu.co/index.php/dyna/article/view/79115>. Acesso em: 14 abr. 2025.

DIAS, R.; MATOS, F. Impactos das mudanças climáticas nos recursos hídricos: desafios e implicações para a humanidade. **Revista Sociedade Científica**, [s. l.], v. 6, n. 1, 2023. Disponível em: <http://revista.scienticociety.net/wp-content/uploads/2023/09/Art00172-2023.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.

DOORENBOS, J. *et al.* Crop water requirements. [s. l.], 1992. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/s8376e>. Acesso em: 14 abr. 2025.

DUBREUIL, V. *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, [s. l.], n. 37, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/15738>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FAO. **The State of World Fisheries and Aquaculture 2022**. [S. l.]: FAO, 2022-. ISSN 1020-5489. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/cc0461en>. Acesso em: 15 abr. 2025.

FERRAZ, R. L. D. S. *et al.* Estimation of productivity gain by irrigated and fertilized forage palm plants (*Opuntia ficus-indica* (L.) Mill. and *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck): systematic review and meta-analysis. **Australian Journal of Crop Science**, [s. l.], n. 13(11):2019, p. 1873–1882, 2019. Disponível em: https://www.cropj.com/ferraz_13_11_2019_1873_1882.pdf. Acesso em: 14 abr. 2025.

FONSECA, V. A. *et al.* Morpho-physiology, yield, and water-use efficiency of *Opuntia ficus-indica* irrigated with saline water. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 41, p. e42631–e42631, 2019. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/42631>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FREIRE, J. D. L. *et al.* Growth of cactus pear cv. Miúda under different salinity levels and irrigation frequencies. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 90, n. 4, p. 3893–3900, 2018. Disponível em: http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0001-37652018000703893&tlng=en. Acesso em: 14 abr. 2025.

LÉDO, A. A. *et al.* Yield and water use efficiency of cactus pear under arrangements, spacings and fertilizations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 23, p. 413–418, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/GfdKNn3r8g4ct9jNYzQQQ8j/?format=html>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LEMOS, M. D. *et al.* Nutritional evaluation of forage cactus fertigated with domestic sewage effluent. **Revista Caatinga**, [s. l.], v. 31, p. 476–486, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rcaat/a/tY6gDDGtDdwDQhBBN7jV8PJ/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, A. S. *et al.* Consumo hídrico e exigência térmica da palma forrageira em ambiente semiárido. **Irriga**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 110–128, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4244>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, A. S. *et al.* Determinação da área de cladódios e fator de correção da palma forrageira sob fertirrigação nitrogenada - DOI: 10.7127/rbai.v14n1001017. **Revista brasileira de agricultura irrigada**, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 3803–3815, 2020. Disponível em: <https://inovagri.org.br/revista/index.php/rbai/article/view/1017>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, L. R. *et al.* Growth, water use and efficiency of forage cactus sorghum intercropping under different water depths. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 22, p. 113–118, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/tdSttc7QNHg5sDRfpV7yJK/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LUCENA, L. R. R. *et al.* Estimating the area and weight of cactus forage cladodes using linear dimensions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 43, p. e45460–e45460, 2021. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/45460>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MAGALHÃES, M. J. R. *et al.* Estratégias para produção animal no semiárido mineiro. **Bionorte**, [s. l.], v. 13, n. 2, p. 575–586, 2024. Disponível em: <http://revistas.funorte.edu.br:80/revistas/index.php/bionorte/article/view/1233>. Acesso em: 14 abr. 2025.

NUNES, J. S. L. *et al.* Índices morfológicos e biofísicos da palma forrageira sob diferentes ambientes de crescimento. **Archivos de Zootecnia**, [s. l.], v. 70, n. 271, p. 230–238, 2021. Disponível em: <https://www.uco.es/ucopress/az/index.php/az/article/view/5503>. Acesso em: 27 maio 2025.

PEDROSA, T. D. *et al.* Use of aquaculture wastewater in the cultivation of cactus pear as an alternative for semi-arid regions. **Discover Applied Sciences**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 249, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05939-6>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PEDROSA, T. D. **Uso agrícola da água residuária da aquicultura e seus impactos na palma forrageira e no solo**. 2023. 121 f. - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo, Mossoró-RN, 2023.

PEREIRA, M. C. A. *et al.* Crescimento de cultivares de palma forrageira irrigada sob diferentes níveis de salinidade em região semiárida. **Irriga**, [s. l.], v. 26, n. 4, p. 814–826, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4399>. Acesso em: 14 abr. 2025.

RAMOS, J. P. F. *et al.* Forage yield and morphological traits of cactus pear genotypes. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 43, p. e51214, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/asagr/a/Gfq7WjCpvsSmK6PsnMKqkRM/>. Acesso em: 14 abr. 2025.

RICE, E. W.; BAIRD, R. B.; EATON, A. D. **Métodos Padrão para o Exame de Água e Esgoto, 23ª Edição**. Washington, DC: American Water Works Association, 2017.

ROSA, L. *et al.* Global agricultural economic water scarcity. **Science Advances**, [s. l.], v. 6, n. 18, p. eaaz6031, 2020.

SANTANA, M. A. *et al.* Efeito de doses de adubação orgânica na produção de palma forrageira. **Nativa**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 167–172, 2021. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/10655>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* **Brazilian Soil Classification System**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018., 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094001>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, J. P. A. S. *et al.* Morphophysiological responses, water, and nutritional performance of the forage cactus submitted to different doses of nitrogen. **Field Crops Research**, [s. l.], v. 308, p. 109273, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378429024000261>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, J. P. A. D. S. *et al.* Técnicas de manejo sustentável para o aporte forrageiro da agricultura familiar no semiárido brasileiro: Palma Forrageira, Irrigação e FonDren. **Revista Brasileira de Geografia Física**, [s. l.], v. 14, n. 7, p. 3910–3931, 2022. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/rbgfe/article/view/250113>. Acesso em: 27 maio 2025.

SARAIVA, V. S.; PRETO, B. L. Uso de efluentes da piscicultura na agricultura irrigada. **Observatório de la economía latinoamericana**, [s. l.], v. 21, n. 12, p. 26505–26518, 2023. Disponível em:

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/2562>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SAS INSTITUTE INC. **Sas university edition**. Versão 9.4, Cary, NC: SAS Institute, 2013. Disponível em: <https://www.sas.com/>. Acesso em: 18 set. 2025.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Brasília, DF: EMBRAPA, 2017. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1085209/1/ManualdeMetodosdeAnalisedeSolo2017.pdf>.

TIBCO STATISTICA™ SOFTWARE. **Statistica: data analysis software system**. Versão 14.0.0. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://docs.tibco.com/products/tibco-statistica-14-0-0>. Acesso em: 15 abr. 2025.

CAPÍTULO II: ASPECTOS BROMATOLÓGICOS DA PALMA FORRAGEIRA FERTIRRIGADA COM EFLUENTE AQUÍCOLA NO SEMIÁRIDO POTIGUAR

RESUMO

A produção animal no semiárido é limitada pela escassez hídrica e baixa qualidade das forragens. Portanto, o reaproveitamento de efluentes aquícolas, ricos em nutrientes, se destaca como alternativa sustentável para melhorar a produção forrageira e inserir a aquicultura no contexto da economia circular. Objetivou-se nesta pesquisa avaliar a composição bromatológica da palma forrageira miúda fertirrigada com efluente aquícola no semiárido potiguar. A instalação do experimento ocorreu em área experimental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, em Mossoró-RN, Brasil. Para isso, utilizou-se o delineamento experimental de blocos casualizados, compreendendo cinco tratamentos (NE0 - 100% água - controle, NE25 - 75% água + 25% efluente, NE50 - 50% água + 50% efluente, NE75 - 25% água + 75% efluente e NE100 - 100% efluente) e cinco repetições. A palma foi irrigada em regime de alternância semanal, aplicando-se água de abastecimento na primeira semana, e as respectivas diluições de efluente na semana subsequente, durante 27 meses, sendo a lâmina bruta obtida com base na evapotranspiração da cultura. Amostras das diluições de efluente foram coletadas bimestralmente para análise físico-química. Ao fim de 27 meses, avaliou-se a composição bromatológica da palma, mensurando-se: matéria seca, umidade, matéria mineral, matéria orgânica, extrato etéreo, fibra detergente neutro, fibra detergente ácido, lignina, hemicelulose, celulose, proteína bruta, nitrogênio proteico, nitrogênio não proteico, fibra detergente neutro corrigida para cinzas e proteína, nutrientes digestíveis totais, carboidratos não fibrosos, açúcares solúveis totais, açúcares redutores e amido. Os dados foram submetidos a métodos multivariados empregando-se a correlação de Pearson, análises fatorial e de componentes principais. A palma forrageira miúda fertirrigada com 25 - 50% de efluente aquícola por 27 meses produz forragem de alto valor nutricional, ao passo que 75 - 100% aumentam a biomassa. A palma fertirrigada com efluente aquícola integra a produção nutritiva e potencializa a geração de reserva forrageira, promovendo segurança alimentar e sustentabilidade no semiárido potiguar e inserção da aquicultura na economia circular.

Palavras-chave: Reuso; Aquicultura sustentável; *Nopalea cochenillifera*, Qualidade nutricional; Segurança hídrica; Alimentação animal.

CHAPTER II: NUTRITIONAL ASPECTS OF FORAGE CACTUS FERTIGATED WITH AQUACULTURE EFFLUENT IN THE POTIGUAR SEMIARID REGION

ABSTRACT

Animal production in semiarid regions is constrained by water scarcity and low forage quality. The reuse of nutrient-rich aquaculture effluents represents a sustainable alternative to enhance forage production and integrate aquaculture into circular economy systems. This study evaluated the nutritional composition of forage cactus (*Opuntia cochenillifera*) fertigated with aquaculture effluent in the Potiguar semiarid region. The experiment was conducted at the Federal Rural University of the Semi-Arid Region experimental station in Mossoró-RN, Brazil, using a randomized block design with five treatments (NE0 - 100% water - control, NE25 - 75% water + 25% effluent, NE50 - 50% water + 50% effluent, NE75 - 25% water + 75% effluent, and NE100 - 100% effluent) and five replications. Irrigation followed a weekly alternating regime: supply water in the first week and respective effluent dilutions in the subsequent week over 27 months, with irrigation depth based on crop evapotranspiration. Effluent samples were collected bimonthly for physicochemical analysis. After 27 months, nutritional composition was assessed through: dry matter, moisture, mineral matter, organic matter, ether extract, neutral detergent fiber, acid detergent fiber, lignin, hemicellulose, cellulose, crude protein, protein nitrogen, non-protein nitrogen, ash and protein corrected neutral detergent fiber, total digestible nutrients, non-fiber carbohydrates, total soluble sugars, reducing sugars, and starch. Data were analyzed using multivariate methods including Pearson correlation, factor analysis, and principal component analysis. Forage cactus fertigated with 25-50% aquaculture effluent for 27 months produced high-nutritional-value forage, while 75-100% concentrations increased biomass production. Fertigation with aquaculture effluent integrates nutritious forage production with enhanced forage reserve generation, promoting food security and sustainability in the Potiguar semiarid region while advancing circular economy integration in aquaculture.

Keywords: Water reuse; Sustainable aquaculture; *Nopalea cochenillifera*; Nutritional quality; Water security; Animal feeding.

INTRODUÇÃO

O crescimento acelerado da aquicultura tem gerado volumes significativos de efluentes ricos em nutrientes, incluindo nitrogênio, fósforo e matéria orgânica, cujo descarte inadequado pode provocar eutrofização de ecossistemas aquáticos, processo que responde por mais de 40% dos casos de degradação de ecossistemas lênticos em regiões de produção aquícola intensiva, com efeitos em cascata sobre toda a teia trófica aquática (Figueiredo *et al.*, 2022).

Neste cenário, o reuso agrícola desses efluentes emerge como solução alinhada aos princípios da economia circular, transformando passivos ambientais em insumos produtivos a partir da reciclagem de nutrientes e da preservação de recursos hídricos. Tal abordagem apresenta sinergia com múltiplos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), destacando-se o ODS 6 (uso eficiente de recursos hídricos), ODS 12 (valorização de resíduos) e ODS 15 (conservação de solos) (Fraga-Corral *et al.*, 2022).

O reuso da água na agricultura apresenta como vantagens o fornecimento de nutrientes essenciais, reduzindo em até 60% a necessidade de fertilizantes convencionais, podendo aumentar até 35% da receita líquida por hectare/ano em comparação aos sistemas tradicionais (Rocha; Silva; Batista, 2023).

No semiárido brasileiro, caracterizado por escassez hídrica e solos em sua maioria degradados, o uso desses efluentes na fertirrigação da palma forrageira se destaca como estratégia promissora para conciliar produção agropecuária e sustentabilidade ambiental, representando paradigma de agricultura circular adaptada às condições edafoclimáticas regionais (Sátiro; Zacardi; Neto, 2022).

Está cactácea, amplamente utilizada na alimentação animal, destaca-se por sua elevada eficiência no uso da água e tolerância às condições edafoclimáticas adversas, rendimentos que variam de 20 a 30 toneladas de matéria seca por hectare a cada ano, com demanda hídrica menor em relação a outras forrageiras tropicais. Além disso, funciona como biofiltro que recicla nutrientes que minimizam impactos ambientais, apresenta tolerância à salinidade e reduzida necessidade de mão de obra (Santos; Donato; Junior, 2020).

A avaliação dos aspectos bromatológicos é fundamental para a produção animal, pois determina a qualidade nutricional da forragem. Para a palma forrageira, os parâmetros mais estudados incluem: proteína bruta, fibra em detergente neutro, fibra em detergente ácido, carboidratos não fibrosos e minerais como cálcio e fósforo. Esses componentes são cruciais para avaliar o valor alimentar da planta, especialmente para ruminantes em condições semiáridas, onde a palma frequentemente constitui a base da dieta (Neupane *et al.*, 2024).

Apesar dos benefícios potenciais, a fertirrigação com efluentes aquícolas apresenta desafios que demandam investigação. A elevada salinidade desses efluentes, com condutividade elétrica que oscila entre 2,5 e 4,5 decisiemens por metro, pode induzir alterações significativas na composição bromatológica da palma forrageira, afetando parâmetros nutricionais essenciais, como teores de proteína bruta, fibras e minerais (Santos *et al.*, 2024).

Estudos preliminares evidenciam que o uso contínuo desses efluentes pode modificar a estrutura da parede celular vegetal, com potenciais impactos na digestibilidade ruminal e no valor alimentar para ruminantes. Além disso, o acúmulo progressivo de sais no solo, particularmente nos Argissolos Vermelho-Amarelos típicos do semiárido, pode comprometer a sustentabilidade do sistema em médio e longo prazo (Fonseca *et al.*, 2022).

Diante do exposto, parte-se da hipótese de que a fertirrigação com efluente aquícola em diferentes concentrações altera significativamente o perfil bromatológico da palma forrageira miúda. Espera-se que diluições moderadas de efluente, entre 25% e 50%, promovam a melhor qualidade nutricional da forragem, com incrementos nos teores de proteína bruta e nutrientes digestíveis totais. Por outro lado, supõe-se que concentrações elevadas de efluente, entre 75% e 100%, priorizem a produção de biomassa em detrimento da qualidade bromatológica, com possíveis aumentos dos teores de fibra em detergente neutro e redução dos carboidratos não fibrosos devido ao estresse salino. Antecipa-se ainda que a análise dos dados permitirá identificar padrões de correlação entre as variáveis químico-bromatológicas e os tratamentos aplicados, revelando associações entre a composição nutricional e as diferentes proporções de efluente. Dessa forma, o presente estudo objetivou avaliar os efeitos da fertirrigação com efluente aquícola na composição químico-bromatológica da palma forrageira miúda cultivada durante 27 meses no semiárido potiguar.

MATERIAL E MÉTODOS

Local do estudo e delineamento experimental

O estudo foi conduzido na Unidade Experimental de Reuso de Água (UERA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), localizada em Mossoró-RN, Brasil (5°12'30,61"S; 37°19'08,36"O; altitude de 67 m), entre outubro de 2021 e dezembro de 2023, totalizando 27 meses de cultivo da palma forrageira miúda (Figura 1).

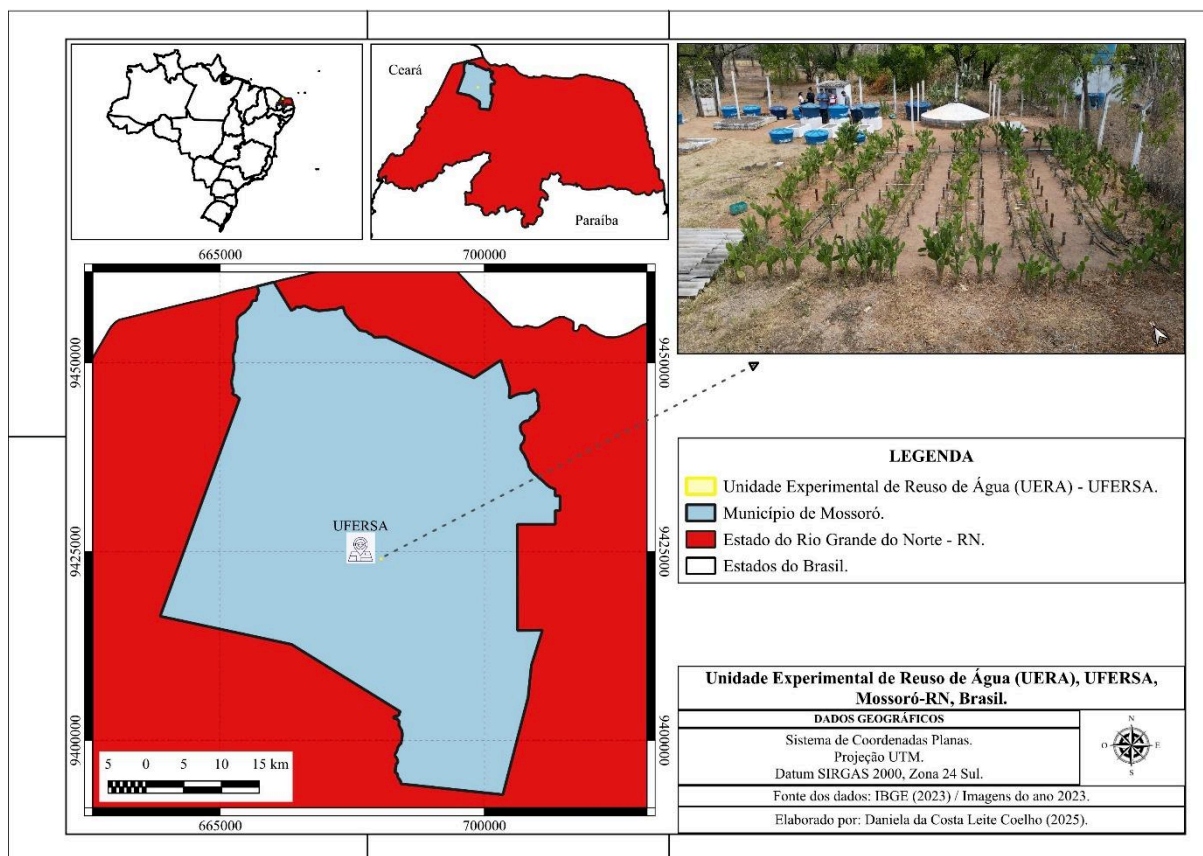


Figura 1. Localização da Unidade Experimental de Reuso de Água na Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil. Fonte: Elaborado por Coelho (2025). Base de dados: IBGE (2023).

Nessa área experimental, prevalece o clima semiárido (BSh, Köppen-Geiger), com precipitação média anual de 790 mm, concentrada entre fevereiro e abril, temperatura média de 27 °C e umidade relativa do ar de 70% (Dubreuil *et al.*, 2018). O solo foi classificado como ARGISSOLO Vermelho-Amarelo eutrófico, com textura franco-arenosa (Santos *et al.*, 2018).

O solo analisado no estudo caracteriza-se como um Argissolo de textura arenosa, com teores de areia superiores a 800 g kg⁻¹ em ambas as camadas (0 - 20 e 20 - 40 cm), acompanhados de baixos teores de argila (50 - 94 g kg⁻¹) e silte (94 - 110 g kg⁻¹). Apresenta densidade do solo variando entre 1,43 e 1,63 g cm⁻³, com maior porosidade na camada subsuperficial. Quimicamente, demonstra pH ligeiramente ácido (6,1 - 6,5), condutividade elétrica muito baixa (0,09 - 0,12 dS m⁻¹) e teores moderados de matéria orgânica (4,2 - 8,0 g kg⁻¹), com capacidade de troca catiônica relativamente baixa (4,5 - 5,1 cmolc dm⁻³). A análise dos cátions trocáveis revela predominância de cálcio (2,7 - 3,2 cmolc dm⁻³) e magnésio (1,6 - 1,7 cmolc dm⁻³), com teores muito reduzidos de potássio (0,3 - 0,4 cmolc dm⁻³) e sódio (0,0 - 1,9 mg dm⁻³) (Pedrosa *et al.*, 2024).

O experimento foi implantado no delineamento de blocos casualizados, com cinco tratamentos e cinco repetições (25 parcelas de 1 m² cada), dispostas em uma área total de 62 m², com bordaduras de 0,80 m e corredores internos de 0,70 m. Os tratamentos consistiram de proporções crescentes de efluente aquícola (EA) diluído em água de abastecimento (AA): NE0 (100% AA), NE25 (75% AA + 25% EA), NE50 (50% AA + 50% EA), NE75 (25% AA + 75% EA) e NE100 (100% EA). O detalhamento da área experimental está ilustrado na Figura 2.

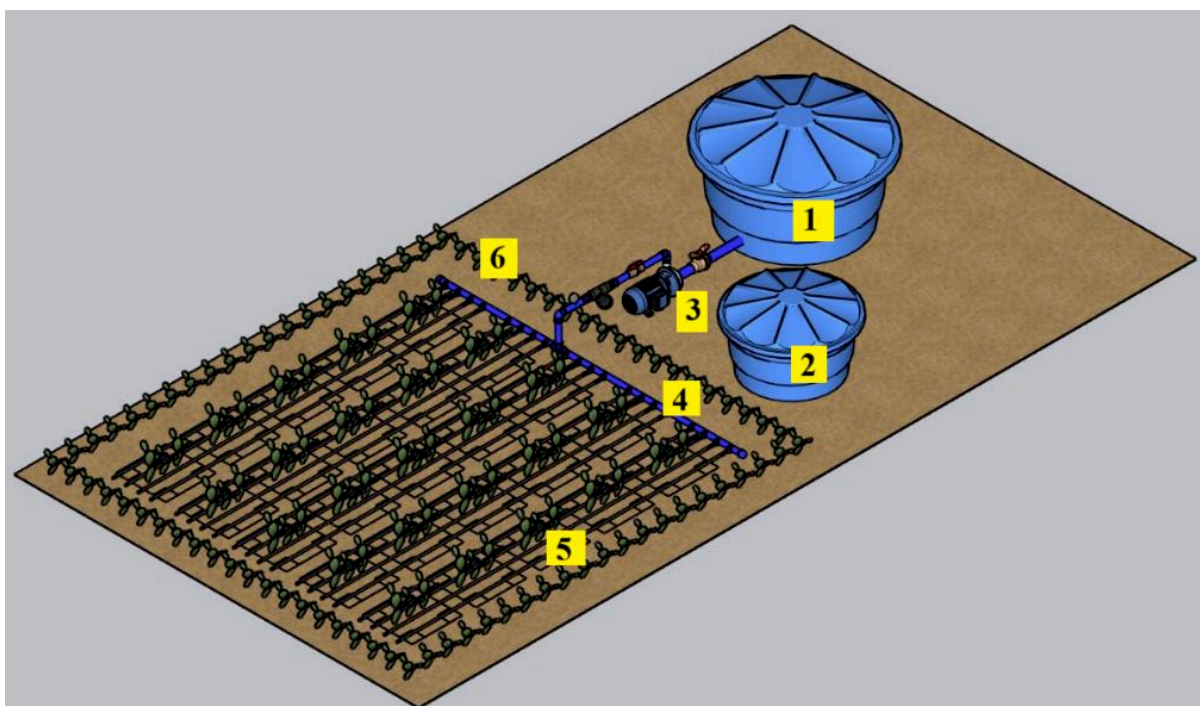


Figura 2. Representação esquemática do delineamento experimental, elaborada no *software SketchUp*. Fonte: Elaborado por Vale (2025). **Nota:** 1 – Reservatório de água de abastecimento; 2 – Reservatório de efluente aquícola; 3 – Cabeçal de controle composto por registro de esfera, motobomba de 0,5 cv, manômetro graduado de 0 a 400 kPa e filtro de tela com abertura de 130 mm; 4 – Linha de derivação; 5 – Linhas laterais com emissores não autocompensantes de 1,6 L h⁻¹; e 6 – Bordadura.

Estabelecimento e manejo da palma forrageira miúda

Foram utilizados cladódios de *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dyck, selecionados de plantas-matrizes cultivadas na Estação Experimental da EMPARN (Apodi-RN). O plantio foi realizado no mês de outubro de 2021, com cladódios previamente cicatrizados 13 dias em sombra e dispostos em posição vertical, enterrando-se metade de seu comprimento no solo. Cada parcela recebeu cinco cladódios, espaçados em 20 cm, com densidade populacional de 29.412 plantas ha⁻¹, seguindo recomendações para maximização da eficiência fotossintética em condições semiáridas (Lédo *et al.*, 2019).

Aos 12 meses de cultivo, duas plantas por parcela foram removidas para análises reportadas por Pedrosa *et al.* (2024), mantendo-se três plantas centrais para as avaliações bromatológicas deste estudo. Para garantir a uniformidade nutricional durante os 27 meses de cultivo da palma forrageira, aplicou-se esterco bovino curtido (20 t ha^{-1}) aos 22 meses após o plantio, incorporado em sulcos distantes 20 cm da base das plantas. Essa adubação complementar visou à reposição de nutrientes sem induzir estresse salino, critério essencial para cultivos irrigados (Santana *et al.*, 2021).

Protocolo de fertirrigação e elementos meteorológicos monitorados

O sistema de irrigação consistiu em alternância semanal entre os tratamentos hídricos. Na primeira semana, aplicou-se exclusivamente água de abastecimento, ao passo que na semana subsequente foram usadas as diluições de efluente aquícola. Interrompia-se a irrigação quando precipitações ultrapassavam 20 mm nas 24 horas antecedentes. A água foi fornecida pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), composta por uma mistura de águas subterrâneas de poços tubulares profundos do município de Mossoró-RN e água superficial da Barragem Armando Ribeiro Gonçalves em Açu-RN. O efluente aquícola foi coletado nas unidades de produção do Setor de Aquicultura da UFERSA, sendo armazenado em reservatórios de polietileno com capacidade para 500 L na unidade experimental.

O conjunto de aplicação compreendeu regadores plásticos (13 L) com bicos dosadores, baldes graduados de polipropileno (11 L) e provetas de polipropileno (1 L) para mensuração dos volumes. Estabeleceu-se como critério de suspensão das irrigações a ocorrência de precipitação pluvial igual ou superior a 20 mm no período de 24 horas antecedentes à irrigação programada, visando a evitar excesso hídrico no sistema radicular. Esta condição foi monitorada por meio dos dados da estação meteorológica automática instalada no campus Leste da UFERSA, situada a 933 m da área experimental.

O cálculo da necessidade hídrica baseou-se na evapotranspiração da cultura (ET_c), determinada mediante metodologia FAO-56 (Allen *et al.*, 2006). A ET_c foi estimada a partir da evapotranspiração de referência (ET_0), calculada pela equação de Penman-Monteith com dados microclimáticos da estação meteorológica local. Aplicou-se um coeficiente de cultivo (K_c) de 0,70, valor estabelecido para palma forrageira na região semiárida (Lima *et al.*, 2021). A reposição hídrica considerou o balanço entre a precipitação efetiva e a demanda evapotranspirativa, assegurando o atendimento das exigências hídricas da cultura (Doorenbos *et al.*, 1992).

O regime pluviométrico apresentou marcada variação interanual, com acumulado total de 1.589,44 mm durante o período experimental de 27 meses. O primeiro ano de cultivo (2021 – 2022) registrou 943,78 mm de precipitação pluvial, ao passo que no segundo ano (2022 – 2023) observou-se redução para 645,66 mm. Essa diferença demandou aumento de 76,4% no volume de irrigação suplementar no segundo ano (178 mm versus 314 mm), totalizando 492 mm de lâmina irrigada ao longo do estudo.

A dinâmica climática foi caracterizada por sazonalidade típica do semiárido, com distribuição irregular das chuvas e elevada demanda evapotranspiratória. A Figura 3 detalha a variação mensal dos principais elementos meteorológicos monitorados: radiação solar global (média de $18,10 \text{ MJ m}^2 \text{ dia}^{-1}$), temperatura do ar (média de $28,18 \text{ }^{\circ}\text{C}$), precipitação pluvial e evapotranspiração de referência (ET_0 média de $4,68 \text{ mm dia}^{-1}$).

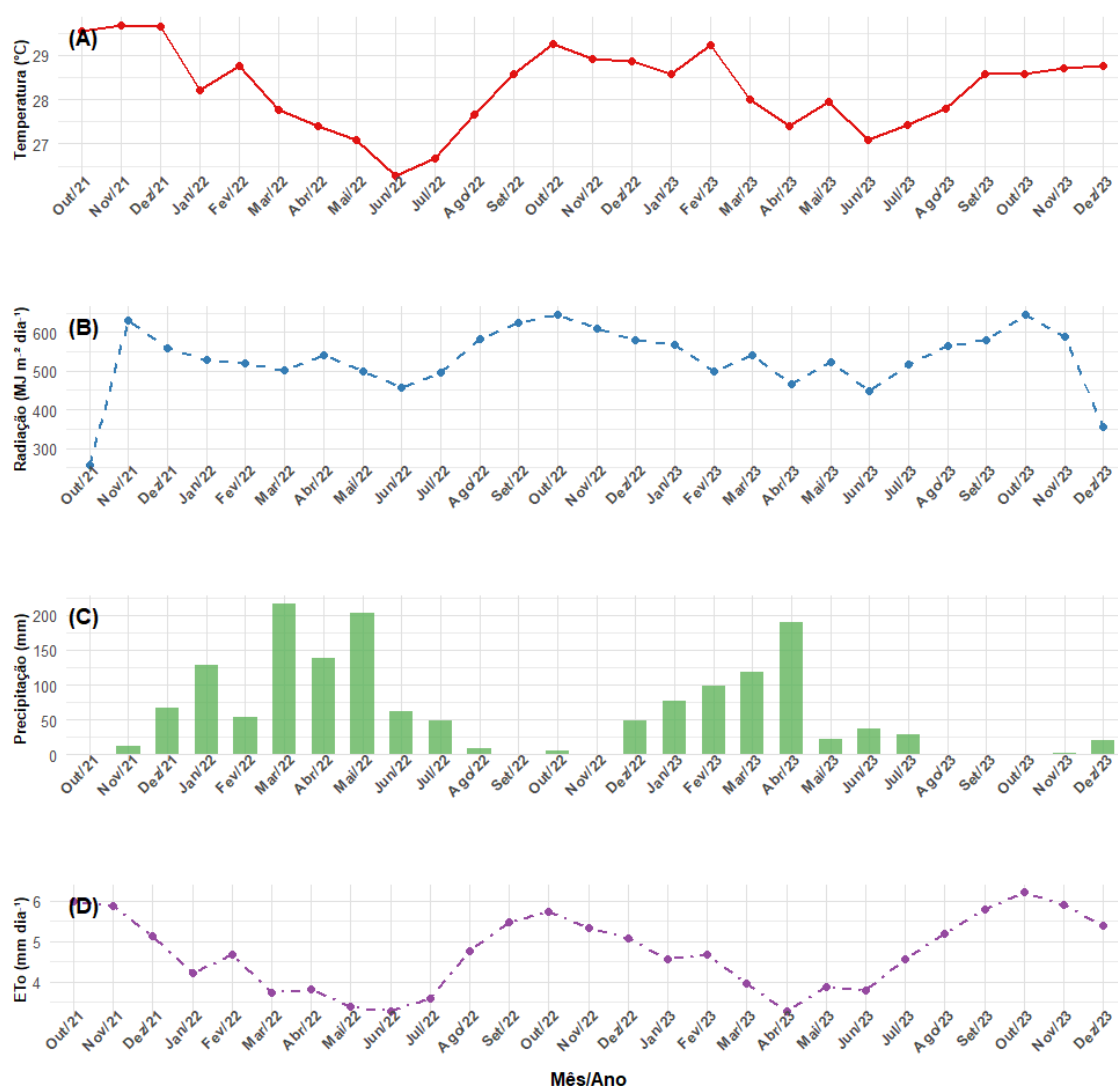


Figura 3. Condições climáticas mensais registradas ao longo do período experimental (outubro/2021 a dezembro/2023). Fonte: Autoria própria (2025).

Monitoramento da qualidade da água

O monitoramento da qualidade da água de irrigação foi realizado a cada dois meses durante o período experimental. As análises foram conduzidas no Laboratório de Análises de Solos, Água e Planta (LASAP – UFERSA), seguindo as metodologias analíticas adotadas por Rice, Baird e Eaton (2017). Foram avaliadas as quatro proporções de efluente aquícola quanto aos parâmetros físico-químicos essenciais, incluindo pH, condutividade elétrica, cátions trocáveis (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+), ânions (Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^-), nutrientes (N - total e P - total) e elementos traço (Fe, Mn, Zn, Cu), conforme demonstrado na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização físico-química média do efluente aquícola monitorado a cada dois meses durante o segundo ano de cultivo da palma forrageira miúda (outubro/2022 a dezembro/2023).

Parâmetros	Unidade	Média e desvio padrão dos tratamentos				
		T1	T2	T3	T4	T5
pH	H ₂ O	8,24 ± 0,53	7,65 ± 0,29	7,67 ± 0,27	7,58 ± 0,25	7,40 ± 0,38
CE	dS m ⁻¹	0,47 ± 0,04	1,55 ± 0,17	2,65 ± 0,57	3,08 ± 0,93	4,74 ± 0,48
Fe ⁺	mg L ⁻¹	0,01 ± 0,03	0,13 ± 0,07	0,08 ± 0,09	0,12 ± 0,14	0,29 ± 0,27
Mn ⁺	mg L ⁻¹	0,00 ± 0,00	0,02 ± 0,03	0,01 ± 0,01	0,01 ± 0,01	0,02 ± 0,01
Zn ²⁺	mg L ⁻¹	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,03 ± 0,02	0,04 ± 0,02
Cu ²⁺	mg L ⁻¹	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	0,01 ± 0,00	0,01 ± 0,01
K ⁺	mmol _c L ⁻¹	0,17 ± 0,13	0,25 ± 0,18	0,40 ± 0,28	0,53 ± 0,34	0,73 ± 0,42
Na ⁺	mmol _c L ⁻¹	3,35 ± 0,91	5,84 ± 1,54	3,31 ± 2,18	3,92 ± 2,24	4,62 ± 2,52
Ca ²⁺	mmol _c L ⁻¹	0,63 ± 0,14	4,24 ± 1,35	7,12 ± 1,52	9,88 ± 2,11	14,71 ± 4,14
Mg ²⁺	mmol _c L ⁻¹	0,56 ± 0,44	4,25 ± 1,83	8,61 ± 3,09	12,14 ± 4,37	17,96 ± 8,29
Cl ⁻	mmol _c L ⁻¹	2,82 ± 0,97	13,40 ± 5,99	17,71 ± 6,93	22,22 ± 8,48	30,52 ± 11,90
CO ₃ ⁻²	mmol _c L ⁻¹	0,25 ± 0,14	0,40 ± 0,11	0,39 ± 0,13	0,42 ± 0,12	0,42 ± 0,14
HCO ₃ ⁻	mmol _c L ⁻¹	2,89 ± 0,30	3,20 ± 0,72	3,43 ± 1,32	4,59 ± 0,72	5,46 ± 0,96
N	mg L ⁻¹	6,97 ± 3,05	8,52 ± 3,10	10,00 ± 3,99	10,01 ± 0,19	10,16 ± 4,02
P	mg L ⁻¹	0,00 ± 0,00	3,45 ± 3,33	7,77 ± 3,77	11,73 ± 0,60	17,83 ± 7,84

Fonte: Autoria própria (2025).

Nota: T1 - 100 de água - Controle; T2 - 75% de água e 25% de efluente; T3 - 50% de água e 50% de efluente; T4 - 25% de água e 75% de efluente; T5 - 100% de efluente; pH - Potencial hidrogeniônico; CE - Condutividade elétrica; Fe⁺ - Ferro; Mn⁺ - Manganês; Zn²⁺ - Zinco; Cu²⁺ - Cobre; K⁺ - Potássio; Na⁺ - Sódio; Ca²⁺ - Cálcio; Mg²⁺ - Magnésio; Cl⁻ - Cloreto; CO₃⁻² - Carbonato; HCO₃⁻ - Bicarbonato; N - Nitrogênio total (N); e P - Fósforo total.

Coleta e preparo das amostras vegetais

Na fase final do experimento, em dezembro de 2023, foram selecionadas as duas plantas mais desenvolvidas de cada parcela experimental para avaliação bromatológica. O protocolo de coleta consistiu na remoção dos cladódios laterais, mantendo temporariamente a estrutura basal

devido à sua conexão com as raízes. Posteriormente, o cladódio basal que continha o sistema radicular foi extraído com instrumentos devidamente higienizados.

O material vegetal coletado foi encaminhado ao LASAP, onde se fez a pesagem inicial das amostras utilizando balança analítica de precisão (0,01g) para obtenção da biomassa fresca. Os cladódios foram submetidos a pré-secagem em casa de vegetação dotada de tela termorrefletora com 50% de sombreamento, onde permaneceram por 15 dias expostos às condições ambientais naturais.

Visando a uniformizar o processo de desidratação, as estruturas vegetais foram cortadas longitudinalmente em segmentos de dimensões padronizadas, utilizando lâminas higienizadas. Esta etapa permitiu maior exposição superficial e, conseqüentemente, secagem mais homogênea. Todas as amostras foram identificadas com etiquetas contendo as informações de tratamento, bloco e repetição, e acondicionadas em sacos de papel kraft.

Posteriormente, o material foi submetido à secagem em estufa de circulação forçada de ar a temperatura controlada de 65°C, até atingir massa constante. A determinação final da biomassa seca foi realizada com auxílio de balança analítica calibrada.

Em seguida, o material foi submetido à trituração em moinho de facas tipo Willey com peneira de 1 mm, operando a 3.500 rpm por 2 minutos, visando à padronização da granulometria para partículas. O produto processado foi homogeneizado e acondicionado em recipientes plásticos herméticos de polipropileno, capacidade 750 gramas cada, devidamente identificados para realização de análises bromatológicas subsequentes (Figura 4).



Figura 4. Metodologia de amostragem e processamento de palma forrageira miúda irrigada com diluições de efluente aquícola para análises bromatológicas aos 27 meses de cultivo. Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** Retirada de duas unidades experimentais da parcela (A); Pesagem da biomassa fresca (B); Secagem em casa de vegetação (C); Cladódios cortados em formato palito (D); Material colocado em sacos de papel (E); Secagem em estufa de circulação de ar forçado; Pesagem de material seco, após atingir peso constante (F); Trituração de material em moinho (G); e Armazenamento em potes de plástico para realização de análises bromatológicas (I).

Caracterização bromatológica da palma forrageira miúda

As análises bromatológicas foram realizadas no Laboratório de Nutrição Animal (LANA), localizado no campus Leste da UFERSA, seguindo os protocolos estabelecidos por (Latimer Júnior, 2023). Com as amostras previamente processadas, a determinação da matéria seca (MS) foi conduzida mediante secagem em estufa a 105 °C até peso constante, calculando-se a umidade (UM) por diferença (100 - %MS). A matéria mineral (MM) foi quantificada por incineração em mufla a 550 °C durante seis horas.

A proteína bruta (PB) foi quantificada pelo método de Kjeldahl, envolvendo digestão com ácido sulfúrico concentrado na presença de catalisador ($K_2SO_4 + CuSO_4$, 10:1), seguida de destilação e titulação com HCl 0,1N, utilizando-se o fator de conversão de 6,25 para nitrogênio proteico.

As frações fibrosas foram determinadas pelo método sequencial de Van Soest (1991). Para a fibra em detergente neutro (FDN), as amostras foram submetidas à ebulição em solução detergente neutra (pH 7,0) por 60 minutos, ao passo que a fibra em detergente ácido (FDA) foi obtida mediante tratamento subsequente com solução detergente ácida (pH 2,0). Os resíduos foram lavados com água destilada e acetona, seguindo-se secagem a 105 °C por 24 horas.

Para caracterização da parede celular, a lignina (LIG) foi determinada pelo método Klason por meio de hidrólise ácida com H_2SO_4 (72%), ao passo que a celulose (CEL) foi estimada como diferença entre FDA e LIG. A hemicelulose (HEM) foi calculada pela diferença entre FDN e FDA, seguindo os procedimentos Van Soest modificados.

Para a correção das cinzas, o material residual da FDN foi submetido à calcinação em mufla a 550 °C durante quatro horas. O teor de cinzas foi calculado pela diferença de peso antes e após a incineração. A correção para proteína insolúvel foi realizada mediante análise do nitrogênio presente no resíduo da FDN pelo método micro-Kjeldahl. FDN foi ajustada para cinzas e proteína (FDNcp) pela diferença (FDN - (cinzas + proteína insolúvel)) (Licitra *et al.* 1996; Mertens, 2003).

O extrato etéreo (EE) foi determinado por extração contínua em aparelho Soxhlet com éter de petróleo por oito horas, precedida de hidrólise ácida com HCl 3N para liberação de lipídeos complexos. Os carboidratos não fibrosos (CNF) foram calculados por diferença [100 - (PB + EE + MM + FDN)]. Os nutrientes digestíveis totais (NDT) foram calculados por meio da equação: $NDT (\%) = (PB + FDN + CNF + (EE \cdot 2,25))100/MS$.

A determinação do nitrogênio não proteico (NNP) foi realizada por diferença entre o nitrogênio total (NT), analisado pelo método micro-Kjeldahl, e o nitrogênio proteico (NP) foi

determinado após precipitação com ácido tricloroacético (TCA) 10% (Figura 5). Entretanto, a aplicação direta do protocolo padrão de digestão (prevendo aquecimento gradual de 100°C até 350 °C com incrementos de 50 °C a cada 30 minutos, seguido de manutenção a 350°C por duas horas) à palma forrageira apresentou limitações, devido ao seu elevado teor de mucilagens e carboidratos estruturais, resultando em ebulição excessiva e perda de material durante o processo.

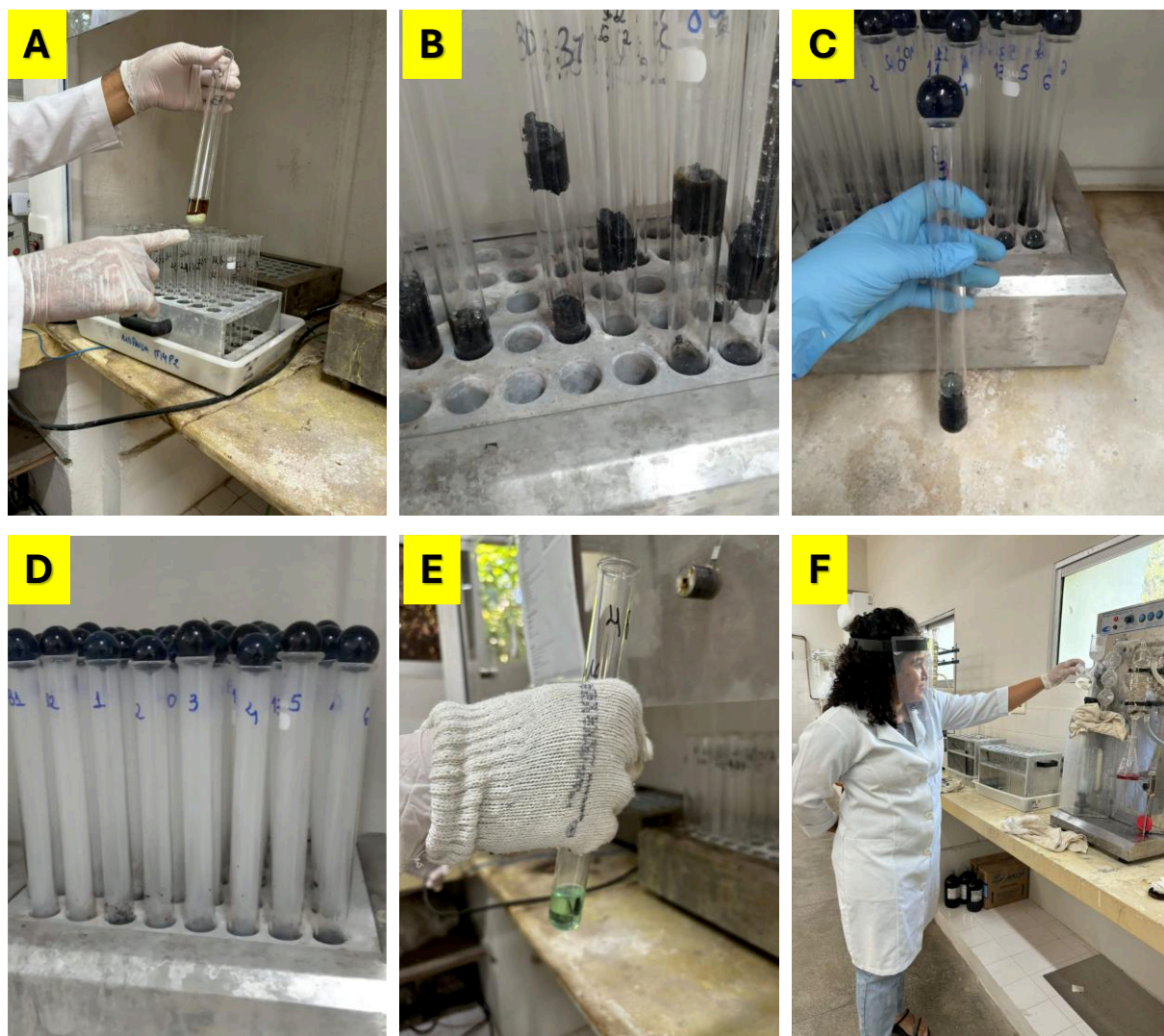


Figura 5. Determinação do nitrogênio total após precipitação com ácido tricloroacético. Fonte: Imagem de autoria própria (2025). **Nota:** Utilização de metodologia padrão (A); Arraste e extravasamento de amostra para fora do tubo durante o processo de digestão (B); Tubos de digestão tampados com esferas de vidro resistentes a altas temperaturas, e esferas de vidro inseridas dentro dos tubos (C); Após adaptação metodológica ocorrência de início da digestão (D); Completa digestão após adaptação metodológica (E); e Preparo para titulação padrão (F).

Para garantir a recuperação quantitativa do nitrogênio, o protocolo foi adaptado com: controle gradual da temperatura (iniciando a 50 °C por 30 minutos com incrementos de 10 °C a cada 30 minutos até 350 °C). Para evitar a perda de material, os tubos de digestão foram

tampados com esferas de vidro resistentes a altas temperaturas, que reduziram o arraste de vapores e a formação de espuma. Adicionalmente, as esferas foram inseridas nos tubos depois da adição da amostra, agindo como barreira física para minimizar o transbordamento durante a fervura. A digestão foi considerada completa apenas quando o líquido no interior dos tubos apresentou coloração esverdeada e ausência de partículas carbonizadas, aproximadamente 18 horas depois do início do processo.

Complementarmente, no Laboratório de Tecnologia de Alimentos (UFERSA), quantificaram-se açúcares solúveis totais (AST), açúcares redutores (AR) e amido (AM). Para determinação dos AST, amostras de palma forrageira foram extraídas com água destilada sob agitação (150 rpm, 60 min). Alíquotas de 100 μ L do sobrenadante foram misturadas com 2 mL de antrona 0,2% em H₂SO₄ concentrado. Após resfriamento em gelo (5 min) e incubação em banho-maria (100°C, 20 min), a absorbância foi lida a 620 nm, utilizando curva padrão de glicose (0-100 μ g/mL).

Para a análise de AR, empregou-se o método colorimétrico baseado na redução do íon cúprico em meio alcalino. Após agitação, o extrato clarificado reagiu com solução cúprica alcalina em banho-maria (100 °C, 20 min). Após resfriamento, adicionou-se 500 μ L de arsenomolibdato e 3,5 mL de água destilada. A leitura a 540 nm utilizou curva de glicose (0-200 μ g/mL) e branco de reagente.

Para a análise de AM, procedeu-se à coleta de 500 μ L da suspensão após o período de agitação inicial, que foram transferidos para tubos de ensaio contendo 3 mL de solução de cloreto de cálcio (CaCl₂), seguido de incubação em banho-maria em ponto de ebulição (100°C) por 20 minutos. Adicionou-se 3 mL de ácido acético (CH₃COOH 0,033M), 2 mL de solução iodada (KI 1% + KIO₃ 0,1%) e 1,5 mL de água destilada. Após 15 minutos protegido da luz, mediu-se a absorbância a 700 nm, com curva de amido purificado (0-200 μ g/mL).

Análise Estatística

Para avaliar os efeitos integrados das diferentes proporções de efluente aquícola, conduziu-se análise multivariada considerando as análises bromatológicas realizadas após desinstalação do experimento. Os cinco tratamentos hídricos avaliados foram submetidos a uma abordagem estatística sequencial no *software* (TIBCO StatisticaTM Software, 2020).

Inicialmente, gerou-se matriz de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) para identificar relações lineares entre as variáveis, classificadas conforme Callegari-Jacques (2003). A Análise de Componentes Principais (ACP) foi então aplicada, retendo componentes com autovalores >

1 e variância explicada acumulada > 88%. Complementarmente, realizou-se Análise Fatorial com rotação Varimax, considerando cargas fatoriais > |0,50| como significativas. A adequação dos dados foi confirmada pelo teste de Bartlett ($p < 0,001$) e medida KMO (> 0,60), com prévia padronização das variáveis (escores z).

Os padrões de agrupamento foram avaliados mediante análise hierárquica utilizando distância euclidiana e método de Ward, com corte de dissimilaridade em 40%. A representação gráfica dos resultados incluiu biplots (ACP) e dendrogramas, permitindo visualizar as relações entre tratamentos e características bromatológicas da palma forrageira. Esta abordagem integrada revelou os padrões de resposta da cultura às diferentes composições da água de irrigação, destacando os tratamentos mais promissores para aplicação prática.

Os dados químico-bromatológicos da palma forrageira foram submetidos ainda à análise de variância (ANOVA), e as médias foram comparadas pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Foram observadas diferenças significativas ($p < 0,05$) entre os tratamentos empregando o *software* estatístico SAS (versão 9.4).

RESULTADOS

Matriz de correlação

A matriz de correlação de Pearson revelou 29 associações significativas entre os parâmetros bromatológicos da palma forrageira fertirrigada com efluente aquícola, sendo 16 correlações negativas e 13 positivas (Tabela 2). Dentre as associações, destacou-se a forte correlação positiva entre matéria seca (MS) e amido (AM) ($r = 0,9$). Observou-se correlação negativa perfeita ($r = -1,0$) entre MS e umidade (UM), e entre nitrogênio proteico (NP) e nitrogênio não proteico (NNP). A matéria seca também esteve correlacionada negativamente com matéria mineral (MM) ($r = -0,9$), ao passo que a umidade apresentou correlação positiva com MM ($r = 0,9$).

Quanto às frações fibrosas, verificou-se alta correlação positiva entre fibra em detergente neutro (FDN) e fibra em detergente ácido (FDA) ($r = 0,97$), e entre FDN e hemicelulose (HEM) ($r = 0,89$). FDA apresentou correlação negativa perfeita com nutrientes digestíveis totais (NDT) ($r = -1,0$), ao passo que a lignina (LIG) se correlacionou positivamente com FDA ($r = 0,90$) e negativamente com NDT ($r = -0,91$). A FDN corrigida para cinzas e proteína (FDN_{cp}) manteve alta correlação positiva com FDN ($r = 0,98$). Paralelamente, registrou-se correlação negativa entre açúcares solúveis totais (AST) e celulose (CEL) ($r = -0,88$).

Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson entre parâmetros bromatológicos da palma forrageira miúda fertirrigada com diluições de efluente aquícola após 27 meses de transplantio.

Variáveis %	MS	UM	MM	MO	EE	FDN	FDA	LIG	HEM	CEL	PB	NP	NNP	FDNcp	NDT	CNF	AST	AR	AM
MS	1,0																		
UM	-1,0*	1,0																	
MM	-0,9*	0,9*	1,0																
MO	0,9*	-0,9*	-1,0*	1,0															
EE	0,1	-0,1	-0,3	0,3	1,00														
FDN	-0,4	0,4	0,3	-0,3	0,22	1,00													
FDA	-0,6	0,6	0,4	-0,4	0,31	0,97*	1,0												
LIG	-0,6	0,6	0,6	-0,6	0,07	0,89*	0,9*	1,00											
HEM	-0,1	0,1	0,1	-0,1	-0,04	0,89*	0,8	0,74	1,00										
CEL	-0,5	0,5	0,2	-0,2	0,53	0,68	0,8	0,48	0,35	1,00									
PB	-0,8	0,8	0,7	-0,7	-0,44	0,40	0,5	0,45	0,23	0,49	1,00								
NP	0,0	0,0	0,2	-0,2	0,44	-0,08	0,0	0,20	-0,21	-0,24	-0,53	1,0							
NNP	0,0	0,0	-0,2	0,2	-0,44	0,08	0,0	-0,20	0,21	0,24	0,53	-1,0*	1,0						
FDNcp	-0,4	0,4	0,4	-0,4	0,19	0,98*	1,0*	0,95*	0,88*	0,58	0,35	0,1	-0,1	1,00					
NDT	0,6	-0,6	-0,4	0,4	-0,31	-0,97*	-1,0*	-0,91*	-0,77	-0,78	-0,46	0,0	0,0	-0,96*	1,0				
CNF	0,7	-0,7	-0,6	0,6	-0,08	-0,91*	-1,0*	-0,94*	-0,69	-0,70	-0,67	0,1	-0,1	-0,91*	1,0*	1,00			
AST	0,8	-0,8	-0,5	0,5	-0,16	-0,54	-0,7	-0,49	-0,20	-0,88*	-0,82	0,3	-0,3	-0,46	0,7	0,75	1,00		
AR	0,3	-0,3	-0,3	0,3	0,86	-0,10	0,0	-0,09	-0,26	0,06	-0,73	0,8	-0,8	-0,05	0,0	0,22	0,26	1,00	
AM	0,9*	-0,9*	-0,9*	0,9*	0,34	0,09	-0,1	-0,25	0,35	-0,08	-0,67	-0,1	0,1	0,03	0,1	0,33	0,50	0,30	1,00

Fonte: Autoria própria (2025).

*Valores destacados em negrito são significativos ($p \leq 0,05$).

Nota: MS – Matéria seca; UM – Umidade; MM – Matéria mineral; MO – Matéria orgânica; EE – Extrato etéreo; FDN – Fibra detergente neutro; FDA – Fibra detergente ácido; LIG – Lignina; HEM – Hemicelulose; CEL – Celulose; PB – Proteína bruta; NP – Nitrogênio proteico; NNP – Nitrogênio não proteico; FDNcp – Fibra detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; NDT – Nutrientes digestíveis totais; CNF – Carboidratos não fibrosos; AST – Açúcares solúveis totais; AR – Açúcares redutores; e AM – Amido.

Agrupamento

A análise de agrupamento hierárquico revelou padrões distintos na composição bromatológica da palma forrageira em resposta à fertirrigação com proporções de efluente aquícola. O dendrograma, construído com base em medidas de dissimilaridade, apresentou estruturação em dois grupos principais (G1 e G2) com características nutricionais bem definidas, conforme Figura 6. A análise fatorial identificou dois grupos principais de parâmetros bromatológicos. O primeiro grupo (G1) agregou CNF, NP, NNP, MO, NDT e UM. O segundo grupo (G2) subdividiu-se em dois subgrupos: o primeiro reuniu AST, PB, HEM, LIG, AR e EE; o segundo agrupou AM, FDN, MM, FDA, MS e CEL.

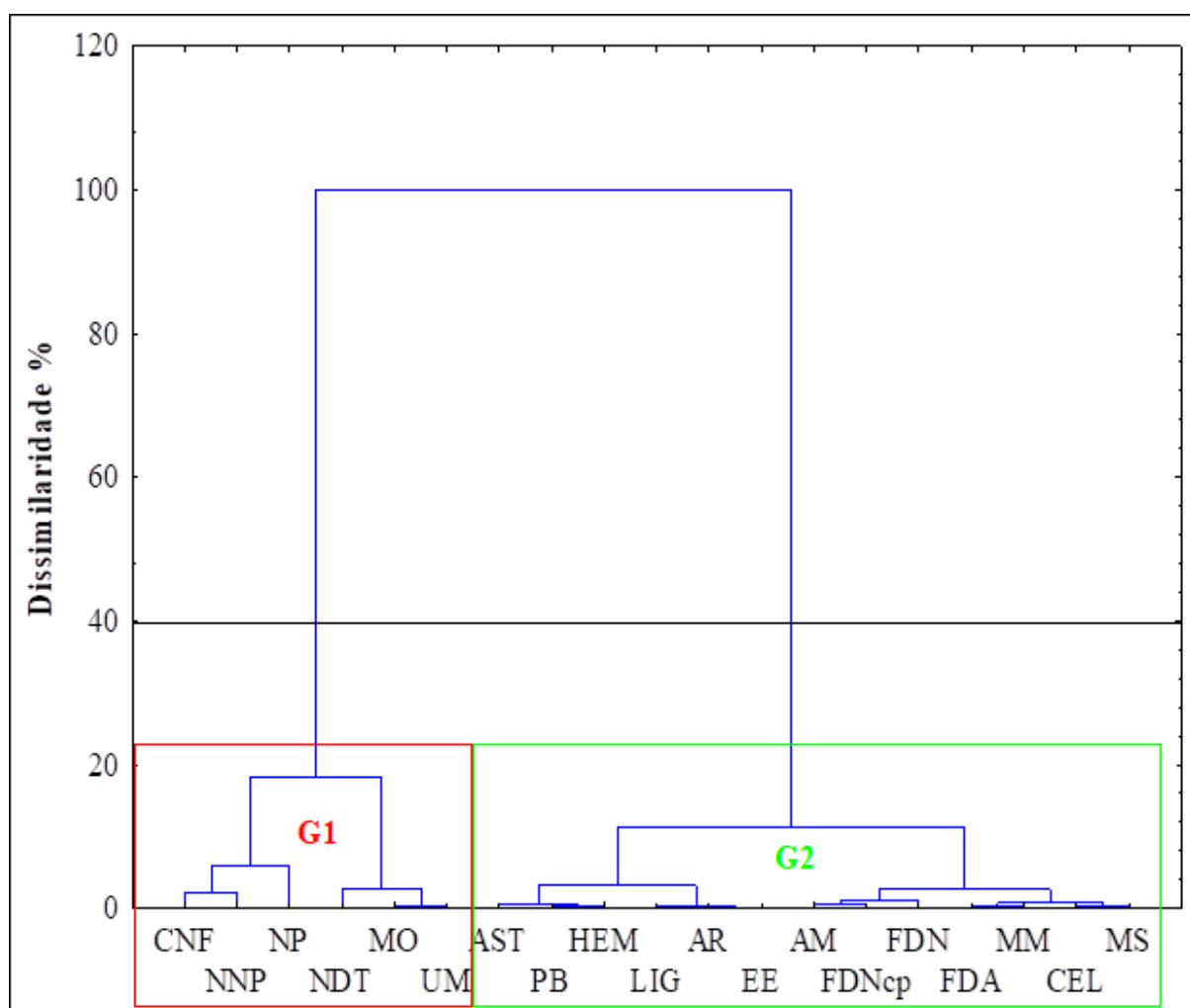


Figura 6. Dendrograma horizontal das variáveis bromatológicas de palma forrageira miúda em resposta à fertirrigação com proporções de efluente aquícola ao fim de 27 meses de cultivo. Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** G1 – Grupo 1; G2 – Grupo 2; MS – Matéria seca; UM – Umidade; MM – Matéria mineral; MO – Matéria orgânica; EE – Extrato etéreo; FDN – Fibra detergente neutro; FDA – Fibra detergente ácido; LIG – Lignina; HEM – Hemicelulose; CEL – Celulose; PB – Proteína bruta; NP – Nitrogênio proteico; NNP – Nitrogênio não proteico; FDNcp – Fibra detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; NDT – Nutrientes digestíveis totais; CNF – Carboidratos não fibrosos; AST – Açúcares solúveis totais; AR – Açúcares redutores; e AM – Amido.

Análise fatorial

A análise fatorial revelou que os quatro fatores principais explicaram conjuntamente 100% da variabilidade total dos dados, demonstrando elevado poder explicativo do modelo adotado (Tabela 3). A análise fatorial identificou quatro fatores principais que explicaram a variância dos dados bromatológicos. O Fator 1 agregou FDN, FDA, LIG, HEM, FDNcp, NDT e CNF. O Fator 2 reuniu MS, UM, MM, MO, PB e AM. O Fator 3 agrupou NP, NNP e AR. O Fator 4 associou CEL e EE.

Tabela 3. Análise fatorial dos componentes principais para características morfométricas e produtivas de palma forrageira miúda fertirrigada com proporções de efluente aquícola.

Parâmetros %	Fator 1	Fator 2	Fator 3	Fator 4
MS	-0,28	-0,93*	0,06	-0,23
UM	0,28	0,93*	-0,06	0,23
MM	0,25	0,96*	0,07	-0,12
MO	-0,25	-0,96*	-0,07	0,12
EE	0,14	-0,31	0,60	0,72*
FDN	0,97*	0,09	-0,07	0,21
FDA	0,90*	0,24	0,01	0,35
LIG	0,89*	0,43	0,14	0,00
HEM	0,95*	-0,18	-0,21	-0,13
CEL	0,49	0,17	-0,15	0,84*
PB	0,26	0,72*	-0,62	0,18
NP	0,01	0,14	0,98*	-0,15
NNP	-0,01	-0,14	-0,98*	0,15
FDNcp	0,98*	0,15	0,06	0,10
NDT	-0,90*	-0,24	-0,01	-0,35
CNF	-0,83*	-0,49	0,09	-0,24
AST	-0,33	-0,56	0,33	-0,68
AR	-0,09	-0,31	0,88*	0,34
AM	0,19	-0,98*	0,02	-0,01
Autovalores	9,65	4,23	3,41	1,71
% Variância	50,80	22,25	17,92	9,02
% Variância acumulada	50,80	73,05	90,98	100,00

Fonte: Autoria própria (2025).

* Eixos fatoriais rotacionados pelo método Varimax; Cargas fatoriais $\geq 0,7$ foram consideradas significativas para fins de interpretação.

Nota: MS – Matéria seca; UM – Umidade; MM – Matéria mineral; MO – Matéria orgânica; EE – Extrato etéreo; FDN – Fibra detergente neutro; FDA – Fibra detergente ácido; LIG – Lignina; HEM – Hemicelulose; CEL – Celulose; PB – Proteína bruta; NP – Nitrogênio proteico; NNP – Nitrogênio não proteico; FDNcp – Fibra detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; NDT – Nutrientes digestíveis totais; CNF – Carboidratos não fibrosos; AST – Açúcares solúveis totais; AR – Açúcares redutores; e AM – Amido.

Análise dos Componentes Principais (ACP)

A análise multivariada dos componentes principais revelou padrões na composição bromatológica da palma forrageira fertirrigada efluente aquícola, destacando interações significativas entre os fatores e implicações práticas para o manejo (Figura 7).

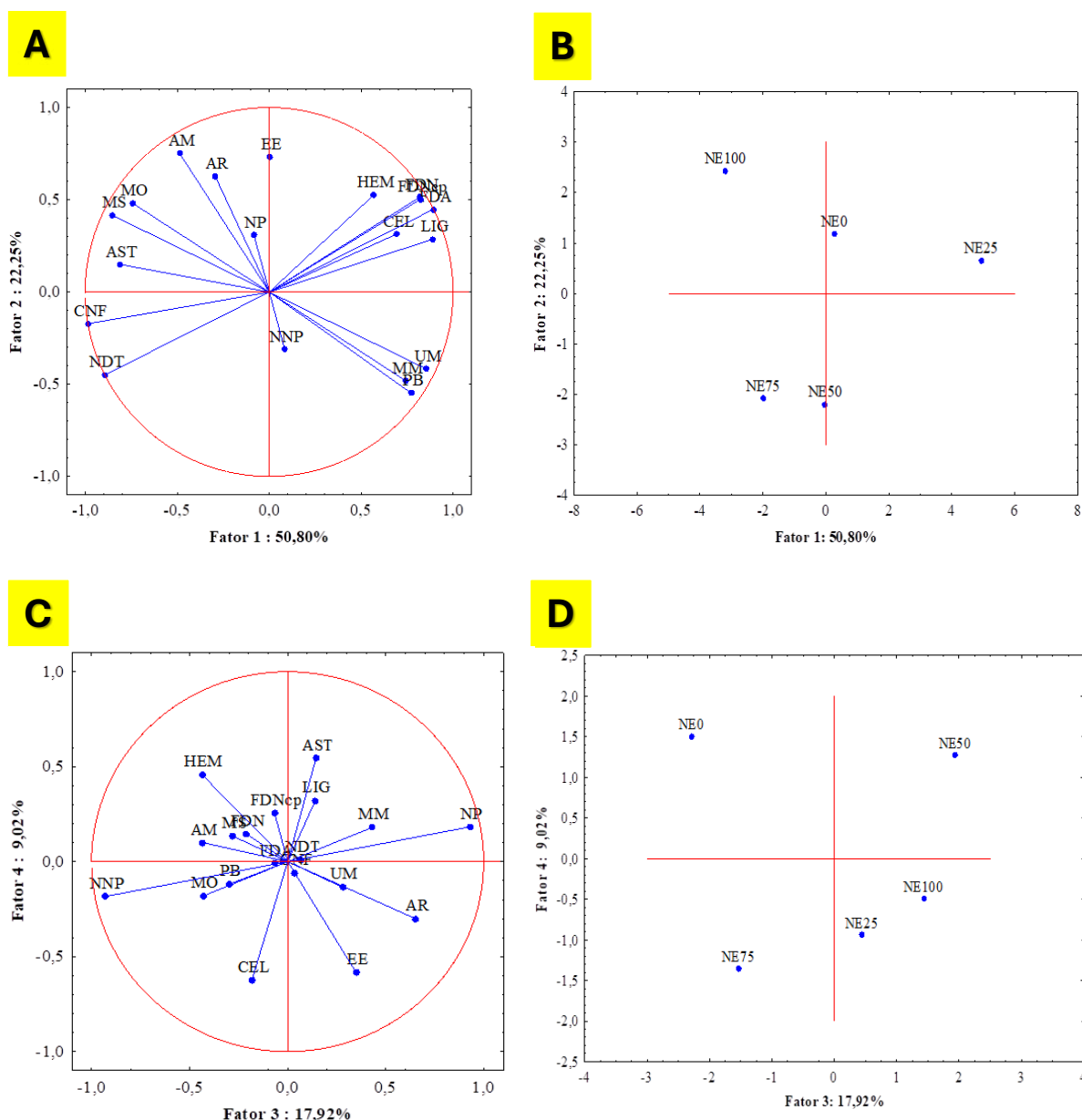


Figura 7. Análise de componentes principais dos parâmetros bromatológicos da palma forrageira fertirrigada com proporções de efluente aquícola definida por quatro fatores principais. Fonte: Autoria própria (2025). **Nota:** MS – Matéria seca; UM – Umidade; MM – Matéria mineral; MO – Matéria orgânica; EE – Extrato etéreo; FDN – Fibra detergente neutro; FDA – Fibra detergente ácido; LIG – Lignina; HEM – Hemicelulose; CEL – Celulose; PB – Proteína bruta; NP – Nitrogênio proteico; NNP – Nitrogênio não proteico; FDNcp – Fibra detergente neutro corrigido para cinzas e proteína; NDT – Nutrientes digestíveis totais; CNF – Carboidratos não fibrosos; AST – Açúcares solúveis totais; AR – Açúcares redutores; e AM – Amido. Todas as variáveis são expressas em %; NE – Nível de efluente diluído; 0, 25, 50, 75 e 100% – Proporções de efluente aquícola usada na de irrigação da palma miúda.

A análise da interação entre os Fatores 1 e 2, os quais em conjunto explicam 73,05% da variabilidade total dos dados (Figuras 7A e 7B), revelou relação de oposição entre características relacionadas à fibra e aquelas associadas às características hídricas e minerais da palma. O Fator 1, responsável pela maior parcela da variância (50,80%), esteve fortemente

associado aos componentes estruturais, como FDN, FDA e LIG. Os tratamentos com concentrações intermediárias de efluente (NE50 e NE75) apresentaram os maiores escores positivos neste eixo. O Fator 2, que explicou 22,25% da variância, correlacionou-se positivamente com UM e negativamente com MS, com destaque para o tratamento NE100.

A interação entre os Fatores 3 e 4, que representaram 26,94% da variância total (Figuras 7C e 7D), mostrou nítida dissociação entre NP e NNP no Fator 3. O Fator 4 destacou-se pela associação entre EE e CEL, com maiores valores nos tratamentos NE25 e NE50.

Teste de médias

A análise da composição químico-bromatológica revelou diferenças significativas na qualidade da forragem de acordo com as diferentes proporções de efluente aquícola aplicadas (Tabela 4). A comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) demonstrou que o tratamento NE25 promoveu os maiores teores de PB (5,79%) e EE (1,15%), ao passo que NE100 resultou na maior concentração de MS (11,89%) e NP (51,64%).

Os teores de FDN variaram significativamente entre os tratamentos, com NE25 apresentando o maior valor (20,52%) e NE75, o menor (17,27%). FDA seguiu padrão similar, com NE25 registrando o maior teor (13,79%) e os tratamentos NE50, NE75 e NE100 não diferindo estatisticamente entre si.

Pela análise de comparação de médias, a LIG apresentou comportamento distinto, com NE25 (2,60%) e NE0 (2,20%) mostrando os maiores teores, significativamente superiores ao NE75 (1,41%). Quanto às frações da parede celular, a HEM foi maior no NE0 (7,46%), diferindo significativamente do NE75 (5,49%).

A CEL manteve-se estável em todos os tratamentos, sem diferenças estatísticas. MM apresentou teores significativamente superiores nos tratamentos NE25 (13,35%) e NE50 (13,44%) em comparação com NE0, NE75 e NE100, que não diferiram entre si.

O teste de Tukey evidenciou que NNP seguiu tendência inversa ao NP, com NE0 (62,87%) e NE75 (66,37%) apresentando os maiores valores, significativamente superiores ao NE100 (48,36%). NDT e CNF mantiveram-se estáveis em todos os tratamentos, sem diferenças significativas.

Tabela 4. Valores médios com desvio padrão dos parâmetros químico-bromatológicos da palma forrageira miúda fertirrigada com diferentes níveis de efluente aquícola.

Parâmetros %	Tratamentos				
	NE0	NE25	NE50	NE75	NE100
MS	11,66 ± 1,06 ^{ab}	10,55 ± 1,42 ^b	10,97 ± 1,39 ^{ab}	11,42 ± 1,40 ^{ab}	11,89 ± 1,52 ^a
UM	88,34 ± 1,06 ^{ab}	89,45 ± 1,42 ^a	89,03 ± 1,39 ^{ab}	88,58 ± 1,40 ^{ab}	88,11 ± 1,52 ^b
MM	12,38 ± 2,32 ^b	13,35 ± 2,42 ^a	13,44 ± 2,48 ^a	12,38 ± 1,53 ^b	12,04 ± 1,42 ^b
MO	87,62 ± 2,32 ^a	86,65 ± 2,42 ^a	86,56 ± 2,48 ^a	87,62 ± 1,53 ^a	87,96 ± 1,42 ^a
EE	0,80 ± 0,31 ^b	1,15 ± 0,48 ^{ab}	0,72 ± 0,48 ^b	0,86 ± 0,36 ^b	1,30 ± 0,61 ^a
FDN	19,80 ± 1,51 ^{ab}	20,52 ± 2,73 ^a	17,80 ± 1,99 ^{bc}	17,27 ± 1,81 ^c	17,27 ± 1,81 ^c
FDA	12,79 ± 0,76 ^b	13,79 ± 1,44 ^a	11,95 ± 1,71 ^c	11,60 ± 2,01 ^c	12,06 ± 2,12 ^c
LIG	2,20 ± 0,85 ^{ab}	2,60 ± 1,42 ^a	2,07 ± 1,64 ^{ab}	1,41 ± 1,17 ^b	1,74 ± 1,10 ^{ab}
HEM	7,46 ± 2,36 ^a	6,82 ± 1,98 ^{ab}	5,83 ± 1,89 ^{ab}	5,49 ± 1,77 ^b	5,92 ± 2,10 ^{ab}
CEL	9,77 ± 0,66 ^a	10,84 ± 1,33 ^a	9,26 ± 1,56 ^a	9,94 ± 1,40 ^a	9,77 ± 1,42 ^a
PB	5,30 ± 1,41 ^{ab}	5,79 ± 1,94 ^a	5,37 ± 1,84 ^{ab}	5,50 ± 1,05 ^{ab}	4,56 ± 1,52 ^b
NP	37,13 ± 8,94 ^c	43,53 ± 11,97 ^{bc}	49,46 ± 19,85 ^{ab}	33,63 ± 4,28 ^c	51,64 ± 19,84 ^a
NNP	62,87 ± 8,94 ^a	56,47 ± 11,97 ^{ab}	50,54 ± 19,85 ^{bc}	66,37 ± 4,28 ^a	48,36 ± 19,84 ^c
FDNc	18,54 ± 1,66 ^a	19,36 ± 3,10 ^a	16,55 ± 2,22 ^a	15,72 ± 1,85 ^a	16,91 ± 2,65 ^a
FDNp	15,79 ± 2,13 ^a	16,59 ± 3,13 ^a	14,09 ± 1,48 ^a	12,74 ± 2,12 ^a	14,04 ± 2,89 ^a
NDT	78,93 ± 0,63 ^a	78,16 ± 1,27 ^a	79,59 ± 0,76 ^a	79,86 ± 1,65 ^a	79,50 ± 1,70 ^a
CNF	61,73 ± 4,66 ^a	59,19 ± 5,96 ^a	62,67 ± 5,42 ^a	63,99 ± 3,48 ^a	64,03 ± 4,93 ^a
AST	7,60 ± 0,00 ^a	5,00 ± 0,00 ^b	7,70 ± 0,00 ^a	6,60 ± 0,00 ^{ab}	8,20 ± 0,00 ^a
AR	0,70 ± 0,00 ^a	0,80 ± 0,00 ^a	0,80 ± 0,00 ^a	0,70 ± 0,00 ^a	1,00 ± 0,00 ^a
AM	17,40 ± 0,00 ^a	13,80 ± 0,00 ^b	12,90 ± 0,00 ^b	14,90 ± 0,00 ^{ab}	17,30 ± 0,00 ^a

Fonte: Autoria própria (2025).

* Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p > 0,05$).

Nota: MS – Matéria seca; UM – Umidade; MM – Matéria mineral; MO – Matéria orgânica; EE – Extrato etéreo; FDN – Fibra detergente neutro; FDA – Fibra detergente ácido; LIG – Lignina; HEM – Hemicelulose; CEL – Celulose; PB – Proteína bruta; NP – Nitrogênio proteico; NNP – Nitrogênio não proteico; FDNc – Fibra detergente neutro corrigido para cinzas; FDNp – Fibra detergente neutro corrigido para proteína; NDT – Nutrientes digestíveis totais; CNF – Carboidratos não fibrosos; AST – Açúcares solúveis totais; AR – Açúcares redutores; e AM – Amido; NE – Nível de efluente diluído; 0, 25, 50, 75 e 100% – Proporções de efluente aquícola usada na de irrigação da palma miúda.

Os parâmetros FDNc e FDNp, bem como a MO, não apresentaram diferenças significativas entre os tratamentos, indicando que a fertirrigação com efluente aquícola não alterou essas características fundamentais da forragem.

A concentração de efluente influenciou significativamente o perfil de carboidratos, com NE100 promovendo maior acúmulo de AST e AM, ao passo que NE25 reduziu o teor de ambos os componentes.

DISCUSSÃO

Os resultados da análise univariada e multivariada demonstram convergência na caracterização dos efeitos da fertirrigação com efluente aquícola na palma forrageira miúda. Na matriz de correlação, a forte correlação entre MS e AM evidencia o papel central deste

polissacarídeo como principal reserva energética na palma forrageira, indicando que a fertirrigação com efluente, mesmo em diferentes diluições, não comprometeu o mecanismo fisiológico primordial da cultura. Esses achados reforçam a capacidade adaptativa de cactáceas em acumular carboidratos sob condições semiáridas como estratégia de resistência ao estresse hídrico (Jesus; Passos; Diniz, 2023).

A correlação negativa entre MS e UM valida o antagonismo fisiológico intrínseco entre esses componentes, no qual o incremento da disponibilidade hídrica, proporcionado pelo efluente aquícola, induz maior turgescência celular e consequente diluição dos sólidos totais nos cladódios. Este mecanismo de diluição, documentado em cultivos sob irrigação, foi reportado por Mesquita *et al.* (2023) em sistemas que utilizam águas residuárias. A associação negativa entre MS e MM e positiva entre UM e MM evidencia que o transporte passivo de íons minerais dissolvidos no fluxo de água absorvida é um mecanismo de aquisição nutricional realizado por plantas suculentas sob regimes de irrigação complementar (Simões *et al.*, 2019).

Paralelamente, a correlação positiva entre MO e AM destaca a contribuição predominante dos carboidratos de reserva na composição da biomassa seca, refletindo a estratégia metabólica típica de cactáceas em ambientes com estresse. Este achado corrobora estudo anterior que destaca estratégia metabólica de cactáceas em ambientes sujeitos a estresse hídrico intermitente, onde a alocação de carbono para compostos de reserva é prioritária (Araújo Júnior *et al.*, 2021).

A análise das frações fibrosas revelou que a parede celular da palma forrageira é predominantemente composta por hemicelulose, e não por celulose, padrão que contrasta com a composição de gramíneas forrageiras, onde a celulose é o polissacarídeo estrutural dominante (Gois *et al.*, 2022). A forte relação negativa entre FDA e NDT demonstra o impacto negativo direto de cada incremento de fibra indigestível na digestibilidade total do nutriente, sendo esse efeito primariamente atribuído à LIG, que corrobora seu papel estabelecido como o principal fator antinutricional na redução da digestibilidade em forragens (Van Soest; Robertson; Lewis, 1991).

A manutenção da alta correlação de FDN_{cp} e FDN indica que o ajuste para cinzas e proteína não altera a natureza intrínseca da fibra, demonstrando que mesmo sob condições de fertirrigação com efluentes a palma forrageira manteve suas características estruturais. Esta particularidade limita seu uso exclusivo em dietas para ruminantes de alto desempenho, reforçando a necessidade de suplementação estratégica com concentrados e fontes fibrosas de melhor qualidade (Marques *et al.*, 2017).

A correlação negativa NP e NNP demonstra que o aporte de nitrogênio via efluente aquícola, embora eleve o teor de proteína bruta, não altera a partição metabólica fundamental entre as frações nitrogenadas. Este equilíbrio homeostático sugere a atuação de um mecanismo regulatório preciso na alocação de nitrogênio, provavelmente mediado por sistemas enzimáticos chave, conforme observado por Jesus, Passos e Diniz (2023).

A correlação negativa entre AST e CEL evidencia clara competição metabólica por precursores de carbono, indicando que a palma forrageira sob fertirrigação com efluente aquícola prioriza a biossíntese de componentes estruturais da parede celular em detrimento da acumulação de carboidratos solúveis. Conforme Pereira *et al.* (2021), esse direcionamento metabólico provoca implicações diretas na qualidade final da forragem, uma vez que a síntese de celulose em detrimento de carboidratos solúveis tende a reduzir a digestibilidade e a palatabilidade do material, uma vez que a fração fibrosa é menos degradável no rúmen. Em contrapartida, teores mais elevados de açúcares solúveis totais são metabolicamente vantajosos, pois potencializam a fermentação ruminal e proporcionam mais rápido aproveitamento energético pelos ruminantes.

Na análise de agrupamento, a configuração do grupo G1 evidencia forte sinergia entre os componentes nutricionais essenciais e a digestibilidade, sugerindo que otimizações nestes parâmetros ocorrem de forma integrada sob condições específicas de fertirrigação. A associação entre CNF e NDT indica papel fundamental dos carboidratos não fibrosos como principais contribuintes para a energia metabolizável da palma forrageira. A inclusão conjunta de NP e NNP reforça a existência de um balanço metabólico dinâmico na alocação de nitrogênio, onde formas orgânicas e inorgânicas mantêm proporções equilibradas mesmo sob diferentes disponibilidades do nutriente. A presença da UM neste grupo destaca o papel modulador da hidratação nos processos metabólicos que determinam a qualidade nutricional, possivelmente facilitando a mobilização e assimilação de compostos nitrogenados e carboidratos solúveis, provavelmente relacionadas à idade do cladódio.

O segundo grupo (G2) apresentou distinção marcante em relação ao G1, dividindo-se em dois subgrupos com características metabólicas específicas. O primeiro subgrupo reuniu metabólitos específicos à ativação de vias metabólicas integradas sob condições específicas de fertirrigação, possivelmente associadas a respostas ao estresse ou à maior disponibilidade nutricional. A associação de LIG e PB, no mesmo grupo, pode evidenciar mecanismo fisiológico de sincronização entre a assimilação de nitrogênio e o processo de lignificação, fenômeno documentado por Gois *et al.* (2022) em culturas forrageiras sob adubação

nitrogenada, onde o excesso de nitrogênio pode estimular a síntese de compostos fenólicos precursores da lignina.

A proximidade entre AST e AR revela coordenação metabólica na dinâmica de acúmulo de carboidratos, sugerindo que a planta modula conjuntamente as reservas de amido e os açúcares solúveis em resposta ao manejo com efluente. Esta configuração do subgrupo reflete, portanto, um estado metabólico distinto no qual a alocação de recursos é direcionada para componentes estruturais e de reserva, em contraste com o perfil mais voltado à digestibilidade característico do G1.

O segundo subgrupo do G2 revela importante relação entre a acumulação de reservas energéticas e a constituição da parede celular. A associação inversa entre AM e os componentes fibrosos (FDN, FDA) é particularmente significativa, pois evidencia divergência metabólica na alocação de fotoassimilados, favorecendo a síntese de amido, que parece suprimir a biossíntese de componentes estruturais, e vice-versa. Este padrão é consistente com observações em outras culturas forrageiras, nas quais o balanço entre carboidratos de reserva e fibras é criticamente influenciado pelo manejo nutricional (Araújo Júnior *et al.*, 2021).

A presença de MS e CEL nesse subgrupo confirma a contribuição dominante da fração celulósica para a massa seca total, reforçando o papel fundamental desta fração fibrosa como principal componente estrutural dos cladódios. Adicionalmente, a inclusão da MM neste subgrupo sugere papel modulador dos minerais na arquitetura da parede celular, possivelmente a partir de sua influência na cristalinidade da celulose ou na formação de polissacarídeos estruturais.

Na análise fatorial, o fator 1, responsável pela maior parcela da variância explicada, agregou variáveis associadas à estrutura da parede celular e qualidade nutricional, evidenciando contraste entre a fibra e o valor energético da forragem, reforçando ainda que o incremento dos componentes fibrosos indigestíveis, principalmente lignina, compromete drasticamente a digestibilidade e o conteúdo de carboidratos não fibrosos. Este achado corrobora o consenso estabelecido na literatura, demonstrado por Lima *et al.* (2015), de que a lignificação é o principal fator antinutricional limitante da qualidade da palma forrageira, atuando como barreira física e química à degradação ruminal.

O fator 2 integrou um conjunto de variáveis antagônicas. Esta estrutura sugere uma relação de compensação fisiológica induzida pela fertirrigação, na qual o aumento da disponibilidade hídrica e mineral proveniente do efluente aquícola promove a formação de tecidos vegetais mais suculentos e com maior concentração de minerais, mas, em contrapartida, determina redução do conteúdo de matéria seca. Como consequência, observa-se menor

acúmulo de matéria seca e de componentes energéticos cruciais, como o amido. O antagonismo entre AM e UM corrobora a conhecida relação inversa entre suculência e reservas de carboidratos em cactáceas, documentada por Silva *et al.* (2020), indicando que a obtenção simultânea de elevados teores de ambos os parâmetros representa um desafio fisiológico e de manejo.

O fator 3 destacou-se por agrupar NP, NNP e AR. Esta associação revela intrínseca coordenação metabólica entre o metabolismo do carbono e do nitrogênio na planta. O padrão observado confirma a existência de um controle bioquímico na partição das formas nitrogenadas, mediado por enzimas-chave como a glutamina sintetase, que parece operar de forma conservada independentemente da dose de efluente aplicada. Este resultado sugere fortemente que a adubação com efluente aquícola, embora aumente a disponibilidade de nitrogênio, não altera significativamente os mecanismos internos de alocação e assimilação deste nutriente na palma forrageira, conforme previamente documentado por Lemos *et al.* (2023). A presença do amido neste mesmo fator parece evidenciar integração entre a assimilação de nitrogênio e a síntese de carboidratos de reserva, sugerindo que o balanço entre esses compostos é metabolicamente acoplado, mantendo a homeostase fisiológica da planta mesmo sob condições de fertirrigação com efluente.

O Fator 4, responsável por 9,02% da variância total, destacou-se pela associação específica entre CEL e EE. Este agrupamento indica que a variação destes componentes ocorre de forma dissociada das demais frações analisadas, sugerindo a atuação de regulações metabólicas distintas. A presença da CEL neste fator isolado pode refletir respostas da biossíntese da parede celular a componentes particulares do efluente aquícola, ao passo que a associação com o EE sugere possível coordenação entre a síntese de compostos estruturais e lipídicos. Esta independência de variação indica que os mecanismos regulatórios para esses constituintes podem estar submetidos a estímulos ambientais ou fisiológicos diferenciados, possivelmente relacionados à composição nutricional do efluente ou a processos metabólicos secundários da planta, conforme observado por Freire *et al.* (2018) em estudos com espécies tolerantes a estresses abióticos.

Na ACP, a relação de oposição entre os Fatores 1 e 2 evidencia compromisso fisiológico entre características estruturais e hídrico-minerais na palma forrageira. O fato dos tratamentos NE50 e NE75 apresentarem maiores escores no Fator 1 indica que concentrações intermediárias de efluente promoveram maiores teores de componentes fibrosos. Este padrão sugere que doses moderadas de efluente, ao fornecerem nutrientes sem saturar completamente o ambiente

radicular, podem estimular a síntese de componentes da parede celular, possivelmente devido a um equilíbrio entre disponibilidade nutricional e estresse hídrico moderado.

Por outro lado, o destaque do tratamento NE100 no Fator 2 caracteriza plantas com tecidos de elevada hidratação e conteúdo mineral, porém com reduzida concentração de sólidos totais e consequente menor densidade energética. Esta relação antagônica possui implicações diretas no manejo, indicando que concentrações moderadas de efluente (NE50 e NE75) se mostraram mais adequadas para sistemas que priorizam forragem com mais equilíbrio entre valor nutritivo e produtividade. Em contrapartida, o uso de efluente não diluído (NE100) mostrou-se mais indicado para produção de biomassa suculenta em períodos de escassez hídrica, embora exija suplementação estratégica com fontes energéticas para compensar as deficiências nutricionais (Oliveira *et al.*, 2023).

A nítida dissociação entre NP e NNP no Fator 3 reflete a manutenção de um balanço metabólico estável entre essas frações nitrogenadas. A conservação desta relação ao longo de todos os tratamentos, inclusive após 27 meses de cultivo sob fertirrigação com efluente, indica notável resiliência e eficiência da palma forrageira na assimilação e conversão do nitrogênio.

O Fator 4, ao destacar a associação entre EE e CEL nos tratamentos NE25 e NE50, revela que condições moderadas de fertirrigação favorecem a síntese de lipídios sem comprometer a integridade estrutural da parede celular. Este padrão sugere que diluições intermediárias de efluente promovem a síntese de compostos energéticos densos enquanto mantêm a arquitetura celular adequada.

Os resultados da análise de variância revelaram que a concentração de efluente aquícola influenciou significativamente ($p < 0,05$) a maioria dos parâmetros químico-bromatológicos da palma forrageira miúda, permitindo identificar respostas específicas para cada tratamento. O NE100 destacou-se com os maiores teores de MS (11,89%) e EE (1,30%), diferindo significativamente do tratamento NE25 para MS e do NE50 para EE. Este padrão sugere que condições de maior disponibilidade nutricional promovem maior acúmulo de sólidos totais e lipídios na forragem. Em contrapartida, o tratamento NE25 apresentou a maior UM (89,45%), refletindo maior turgescência celular sob esta concentração específica de efluente (Lucena *et al.*, 2021).

O teor de proteína bruta foi significativamente superior no NE25 (5,79%) em comparação ao NE100 (4,56%), indicando que concentrações moderadas de efluente são mais eficientes em estimular a síntese proteica. O perfil das frações nitrogenadas revelou padrão distinto, com NE100 registrando o maior NP (51,64%) e menor NNP (48,36%), ao passo que NE0 e NE75 apresentaram comportamento inverso. Esta resposta demonstra diferentes

estratégias de assimilação nitrogenada conforme a concentração de efluente aplicada (Araújo Júnior *et al.*, 2021).

Os tratamentos NE25 e NE50 apresentaram os maiores teores de MM (13,35% e 13,44%, respectivamente), sugerindo maior eficiência na absorção de minerais nestas concentrações. Quanto às frações fibrosas, o NE25 registrou os maiores valores de FDN (20,52%) e FDA (13,79%), diferindo significativamente dos tratamentos com menores concentrações. A lignina seguiu tendência similar, com NE25 (2,60%) diferindo de NE75 (1,41%). A relação inversa entre componentes fibrosos e digestibilidade foi evidenciada pelo menor NDT no NE25 (78,16%) em comparação com NE75 (79,86%), embora esta diferença não tenha sido estatisticamente significativa (Lemos *et al.*, 2023).

O NE100 promoveu os maiores teores de AST (8,2%) e AM (17,3%), constituindo a opção mais adequada para sistemas que demandam alta densidade energética. Em contrapartida, o NE25 apresentou os menores teores de AST (5,0%) e AM (13,8%), refletindo alteração do particionamento de fotoassimilados sob esta concentração específica. Notavelmente, parâmetros como MO, CEL, FDN_c e FDN_p, NDT e CNF não apresentaram diferenças estatísticas entre os tratamentos. Tal estabilidade demonstra a resiliência metabólica da palma forrageira em manter características fundamentais de qualidade nutricional, independentemente da concentração de efluente aplicada (Simões *et al.*, 2019).

Os resultados deste estudo permitem estabelecer recomendações técnicas para o uso de efluente aquícola na fertirrigação da palma forrageira, conforme o perfil produtivo de cada sistema. Para rebanhos leiteiros ou animais em terminação, recomenda-se a aplicação de 100% de efluente (NE100), visando a maximizar o aproveitamento dos elevados teores de carboidratos não fibrosos (64,03%) e açúcares solúveis totais (8,2%), componentes essenciais para atender às altas demandas energéticas dessas categorias (Jesus; Passos; Diniz, 2023). Para sistemas de cria e recria, a concentração de 25% de efluente (NE25) mostra-se mais adequada, uma vez que proporciona maior teor de proteína bruta (5,79%) e melhor balanço entre valor nutritivo e produtividade de biomassa, atendendo às exigências de animais em desenvolvimento. A adoção dessas recomendações, associada a ciclos de colheita entre 90-120 dias, potencializa a qualidade da forragem e pode reduzir em até 35% os custos com suplementação alimentar, representando significativa vantagem econômica para os produtores do semiárido (Sousa *et al.*, 2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A fertirrigação com efluente aquícola altera significativamente o perfil bromatológico da palma forrageira miúda, permitindo direcionar a qualidade da forragem conforme o objetivo produtivo. O uso de efluente aquícola na proporção de 25% na fertirrigação mostrou-se ideal para sistemas que priorizam teor proteico, ao passo que 100% de efluente maximizam a densidade energética da forragem. A estabilidade observada em parâmetros fundamentais, como nutrientes digestíveis totais e carboidratos não fibrosos em todas as concentrações testadas, demonstra a resiliência metabólica da cultura.

As análises estatísticas univariada e multivariada revelaram-se complementares, identificando tanto diferenças significativas entre tratamentos quanto redes de correlação entre os parâmetros químico-bromatológicos. O uso do efluente aquícola mostrou-se técnica e economicamente viável, pois produz forragem de qualidade com custo reduzido, aproveitando um resíduo que seria descartado. Esta prática representa uma alternativa sustentável que integra aquicultura e pecuária a partir do reuso de nutrientes, com potencial de reduzir custos de produção e aumentar a resiliência dos sistemas agropecuários da região.

REFERÊNCIAS

ABREU FILHO, G. *et al.* Effects of replacing ground corn with *Nopalea cochenillifera* meal on the intake, performance, and economic viability of grazing steers. **Tropical Animal Health and Production**, [s. l.], v. 54, n. 1, p. 35, 2022.

ALLEN, R. G. *et al.* Evapotranspiration del cultivo. Guias para la determinacion de los requerimientos de agua de los cultivos. **Estudio FAO: Riego y Drenaje (FAO)**, [s. l.], n. 56, 2006. Disponível em: <https://agris.fao.org/search/en/providers/122621/records/6472496908fd68d54600a223>. Acesso em: 14 abr. 2025.

ARAÚJO JÚNIOR, G. N. *et al.* Productivity, bromatological composition and economic benefits of using irrigation in the forage cactus under regulated deficit irrigation in a semiarid environment. **Bragantia**, [s. l.], v. 80, p. e1221, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/brag/a/5HpHWgPDVVFDsYJgSgLJxwx/?lang=en>. Acesso em: 4 maio 2025.

DOORENBOS, J. *et al.* Crop water requirements. [s. l.], 1992. Disponível em: <https://openknowledge.fao.org/handle/20.500.14283/s8376e>. Acesso em: 14 abr. 2025.

DUBREUIL, V. *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil : uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Confins. Revue franco-brésilienne de géographie / Revista franco-brasileira de geografia**, [s. l.], n. 37, 2018. Disponível em: <https://journals.openedition.org/confins/15738>. Acesso em: 14 abr. 2025.

FIGUEIREDO, F. M. *et al.* **Qualidade da água na piscicultura**. In: [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: <https://biblioteca.unisced.edu.mz/handle/123456789/2790>. Acesso em: 30 maio 2025.

FONSECA, V. A. *et al.* Nutrients in ‘Gigante’ forage cactus pear under different saline water irrigation depths and planting densities. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 26, p. 381–389, 2022. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/BYLMr4cgBjy48DH9PNdCRnS/?lang=en>. Acesso em: 3 maio 2025.

FRAGA-CORRAL, M. *et al.* Aquaculture as a circular bio-economy model with Galicia as a study case: How to transform waste into revalorized by-products. **Trends in Food Science & Technology**, [s. l.], v. 119, p. 23–35, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0924224421006397>. Acesso em: 21 abr. 2025.

FREIRE, J. D. L. *et al.* Growth of cactus pear cv. Miúda under different salinity levels and irrigation frequencies. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, [s. l.], v. 90, p. 3893–3900, 2018. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/aabc/a/xVF66TJz87yjpNCWjKtThsg/?lang=en>. Acesso em: 5 maio 2025.

GOIS, G. C. *et al.* Nutritional and fermentative profile of forage sorghum irrigated with saline water. **Biological Rhythm Research**, [s. l.], v. 53, n. 2, p. 246–257, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/09291016.2019.1629088>. Acesso em: 4 maio 2025.

JESUS, M. S. D.; PASSOS, A. R.; DINIZ, R. P. Genetic diversity for agronomic and bromatological traits in forage cactus. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 46, n. 1, p. e62752, 2023. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/62752>. Acesso em: 4 maio 2025.

LATIMER JÚNIOR, G. W. (org.). Official Methods of Analysis: 22nd Edition (2023). In: **Official methods of analysis of AOAC INTERNATIONAL**. 22. ed. [S. l.]: Oxford University Press, 2023. p. 0. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/9780197610145.002.001>. Acesso em: 1º maio 2025.

LÉDO, A. A. *et al.* Yield and water use efficiency of cactus pear under arrangements, spacings and fertilizations. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, [s. l.], v. 23, p. 413–418, 2019. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbeaa/a/GfdKNn3r8g4ct9jNYzQQQ8j/?format=html>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LEMOES, B. V. *et al.* Bromatological chemical composition of palma miúda adensada using two types of organic fertilizer. **Diversitas Journal**, [s. l.], v. 8, n. 3, p. 2935–2948, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/372836710_Composicao_quimica_bromatologica_d_a_Palma_Miuda_Adensada_utilizando_dois_tipos_de_adubacao_organica. Acesso em: 5 maio 2025.

LICITRA, G.; HERNANDEZ, T. M.; VAN SOEST, P. J. Standardization of procedures for nitrogen fractionation of ruminant feeds. **Animal feed science and technology**, Amsterdam, v. 57, n. 4, p. 347-358, 1996.

LIMA, A. S. de *et al.* Consumo hídrico e exigência térmica da palma forrageira em ambiente semiárido. **Irriga**, [s. l.], v. 1, n. 1, p. 110–128, 2021. Disponível em: <https://revistas.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/4244>. Acesso em: 14 abr. 2025.

LIMA, G. F. C. *et al.* Effect of different cutting intensities on morphological characteristics and productivity of irrigated nopalea forage cactus. **Acta Horticulturae**, [s. l.], n. 1067, p. 253–258, 2015. Disponível em: https://www.actahort.org/books/1067/1067_35.htm. Acesso em: 5 maio 2025.

LUCENA, L. R. R. de *et al.* Estimating the area and weight of cactus forage cladodes using linear dimensions. **Acta Scientiarum. Agronomy**, [s. l.], v. 43, p. e45460–e45460, 2021. Disponível em: <https://periodicos.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/45460>. Acesso em: 14 abr. 2025.

MARQUES, O. F. C. *et al.* Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. **Caderno de Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 9, n. 1, p. 75–93, 2017.

MESQUITA, F. O. *et al.* Multivariate analysis of physical and chemical soil attributes under forage palm cultivation and agriculture reuse in the semiarid region. **Journal of Agricultural Science**, [s. l.], v. 15, n. 2, p. p56, 2023. Disponível em: <https://ccsenet.org/journal/index.php/jas/article/view/0/48249>. Acesso em: 4 maio 2025.

MERTENS, D. R. Challenges in measuring insoluble dietary fiber. **Journal of animal science**, Champaign, v. 81, n. 12, p. 3233-3249, 2003.

NEUPANE, D. *et al.* Biomass production of 14 accessions of cactus pear (*Opuntia* spp.) under semi-arid land conditions. **Journal of Agronomy and Crop Science**, [s. l.], v. 210, n. 2, p. e12705, 2024. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/jac.12705>. Acesso em: 30 maio 2025.

OLIVEIRA, P. V. C. *et al.* Silagem mista de sorgo e palma forrageira: composição, digestibilidade, fermentação e perdas. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 44, n. 2, p. 929–936, 2023. Disponível em: <https://ojs.uel.br/revistas/uel/index.php/semagrarias/article/view/46923>. Acesso em: 6 maio 2025.

PEDROSA, T. D. *et al.* Use of aquaculture wastewater in the cultivation of cactus pear as an alternative for semi-arid regions. **Discover Applied Sciences**, [s. l.], v. 6, n. 5, p. 249, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42452-024-05939-6>. Acesso em: 14 abr. 2025.

PEREIRA, G. A. *et al.* Intake, nutrient digestibility, nitrogen balance, and microbial protein synthesis in sheep fed spineless-cactus silage and fresh spineless cactus. **Small Ruminant Research**, [s. l.], v. 194, p. 106293, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S092144882030242X>. Acesso em: 5 maio 2025.

RICE, E. W.; BAIRD, R. B.; EATON, A. D. **Métodos padrão para o exame de água e esgoto**. 23ª Edição. Washington, DC: American Water Works Association, 2017.

ROCHA, T. A. L. C. G.; SILVA, S. S.; BATISTA, R. O. Cultivo da palma forrageira irrigada com águas residuárias: uma revisão sistemática: Cultivation of cactus pear irrigated with wastewater: a systematic review. **Revista Macambira**, [s. l.], v. 7, n. 1, p. 1–12, 2023. Disponível em: <https://revista.lapprudes.net/RM/article/view/947>. Acesso em: 3 maio 2025.

SANTANA, M. A. *et al.* Efeito de doses de adubação orgânica na produção de palma forrageira. **Nativa**, [s. l.], v. 9, n. 2, p. 167–172, 2021. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/10655>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, H. G. *et al.* **Brazilian Soil Classification System**. [S. l.]: Brasília, DF: Embrapa, 2018. Disponível em: <http://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/handle/doc/1094001>. Acesso em: 14 abr. 2025.

SANTOS, M. R. *et al.* Palma forrageira irrigada com água salina sob densidades de plantio em três ciclos produtivos. **Nativa**, [s. l.], v. 12, n. 3, p. 542–550, 2024. Disponível em: <https://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/nativa/article/view/16356>. Acesso em: 3 maio 2025.

SANTOS, M. R.; DONATO, S. L. R.; COTRIM JUNIOR, P. R. F. Irrigação na palma forrageira. **Revista Agrotecnologia - Agrotec**, [s. l.], v. 11, n. 1, p. 75–86, 2020. Disponível em: <http://www.revista.ueg.br/index.php/agrotecnologia/article/view/9823>. Acesso em: 3 maio 2025.

SAS INSTITUTE INC. **Sas university edition**. Versão 9.4, Cary, NC: SAS Institute, 2013. Disponível em: <https://www.sas.com/>. Acesso em: 18 set. 2025.

SÁTIRO, T. M.; ZACARDI, D. M.; NETO, O. B. A. Reutilização do efluente de piscicultura para fertirrigação: uma alternativa ambiental e economicamente rentável. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, [s. l.], v. 16, n. 1, p. 161–180, 2022. Disponível em: <https://editoraessentia.iff.edu.br/index.php/boletim/article/view/15992>. Acesso em: 3 maio 2025.

SILVA, A. S. *et al.* Análise multivariada da palma forrageira: características morfoprodutivas sob correlações canônicas. **Agrarian**, [s. l.], v. 13, n. 47, p. 100–106, 2020. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/agrarian/article/view/10621>. Acesso em: 5 maio 2025.

SIMÕES, W. L. *et al.* Chemical-bromatological characteristics of forage sorghum varieties irrigated with saline effluents from fish farming. **Comunicata Scientiae**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 195–202, 2019. Disponível em: <https://www.comunicatascientiae.com.br/comunicata/article/view/1943>. Acesso em: 4 maio 2025.

SOUSA, L. F. *et al.* Consumo e digestibilidade dos nutrientes e de água de vacas leiteiras recebendo níveis de palma forrageira. **Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica**, [s. l.], v. 4, 2024. Disponível em: <http://anais2.uesb.br/index.php/semicit/article/view/3691>. Acesso em: 6 maio 2025.

TIBCO STATISTICA™ SOFTWARE. **Statistica: data analysis software system**. Versão 14.0.0. [S. l.: s. n.], 2020. Disponível em: <https://docs.tibco.com/products/tibco-statistica-14-0-0>. Acesso em: 15 abr. 2025.

VAN SOEST, P. J.; ROBERTSON, J. B.; LEWIS, B. A. Methods for dietary fiber, neutral detergent fiber, and nonstarch polysaccharides in relation to animal nutrition. **Journal of Dairy Science**, [s. l.], v. 74, n. 10, p. 3583–3597, 1991. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022030291785512>. Acesso em: 4 maio 2025.

CONCLUSÃO GERAL

O presente trabalho demonstrou que a fertirrigação com efluente aquícola é uma estratégia técnica e economicamente viável para a produção sustentável da palma forrageira miúda no semiárido potiguar. A análise integrada dos parâmetros morfológicos e químico-bromatológicos permitiu estabelecer recomendações de manejo conforme o objetivo produtivo.

A concentração de 25% de efluente mostrou-se ideal para sistemas que priorizam a qualidade nutricional, proporcionando maior teor de proteína bruta e melhor equilíbrio entre valor nutritivo e produtividade. Esta diluição é especialmente recomendada para animais em crescimento e matrizes em manutenção.

Para categorias com alta exigência energética, como vacas em lactação e animais em terminação, a aplicação de 100% de efluente mostrou-se mais adequada, promovendo maiores teores de carboidratos não fibrosos e açúcares solúveis totais, componentes essenciais para atender às demandas metabólicas dessas categorias.

A cultura demonstrou notável resiliência fisiológica, mantendo estabilidade em parâmetros fundamentais, como nutrientes digestíveis totais e perfil nitrogenado em todas as concentrações testadas. Esta previsibilidade da qualidade da forragem representa significativa vantagem para o planejamento alimentar dos rebanhos.

A integração eficiente entre aquicultura e pecuária promove economia circular a partir do reuso de nutrientes e redução de custos com fertilizantes e suplementação. A adoção dessas recomendações contribui para aumentar a resiliência e sustentabilidade dos sistemas produtivos do semiárido, representando um avanço para a agricultura familiar da região.