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

DANNIELY DE OLIVEIRA COSTA

UTILIZAÇÃO DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO NA PRODUÇÃO E CAPACIDADE DE FITOEXTRAÇÃO DE CACTÁCEA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

MOSSORÓ
2019

DANNIELY DE OLIVEIRA COSTA

UTILIZAÇÃO DE ÁGUA PRODUZIDA DO PETRÓLEO NA PRODUÇÃO E CAPACIDADE DE FITOEXTRAÇÃO DE CACTÁCEA NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO

Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de "Doutora em Manejo de Solo e Água".

Linha de pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água.

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

Coorientadora: Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa

MOSSORÓ
2019

© 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 n° 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei n° 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.

C837u Costa, Danniely de Oliveira.
Utilização de água produzida do petróleo na produção e capacidade de fitoextração de cactácea no semiárido brasileiro / Danniely de Oliveira Costa. - 2019.
135 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista.
Coorientadora: Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2019.

1. Água residuária. 2. Fitorremediação. 3. Impactos. 4. Solo. 5. Planta. I. Batista, Rafael Oliveira, orient. II. Costa, Fabrícia Gratyelli Bezerra, co-orient. III. Título.

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.

DANNIELY DE OLIVEIRA COSTA

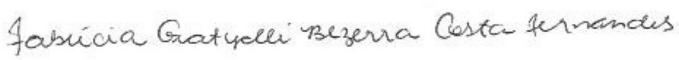
Tese apresentada ao Doutorado em Manejo de Solo e Água do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água da Universidade Federal Rural do Semi-Árido - UFERSA, como parte dos requisitos para obtenção do título de “Doutora em Manejo de Solo e Água”.

Linha de pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água.

Defendida em: 27/02/2019

BANCA EXAMINADORA

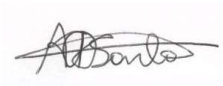
Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista - UFERSA
Presidente



Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa
Membro Examinador

Dra. Kaline Dantas Travassos - UFERSA
Membro Examinador

Prof. Dr. Alex Pinheiro Feitosa - UFERSA
Membro Examinador



Prof.ª Dra. Anne Gabriella Dias Santos - UERN
Membro Examinador

Aos meus avós maternos, **Maria Nogueira da Costa** (*in memoriam*) e **Pedro Eleutério da Costa** (*in memoriam*), pelo exemplo de garra e honestidade.

DEDICO

Aos meus pais, **Maria Aparecida Nogueira da Costa** e **Neilson Teixeira de Oliveira**.

Às minhas irmãs, **Daiane de Oliveira Costa** e **Paula Beatriz de Oliveira Costa**.

Ao meu esposo, **Hudson Salatiel Marques Vale**.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Sou grata a Deus, em primeiro lugar, pelo dom da vida, por iluminar meu caminho e me conceder saúde para que eu possa realizar meus sonhos.

Aos meus pais, Maria Aparecida Nogueira da Costa e Neilson Teixeira de Oliveira, por serem minha base, pelo amor incondicional, dedicação e esforço, por sempre apoiarem as minhas decisões.

Às minhas irmãs Daiane de Oliveira Costa e Paula Beatriz de Oliveira Costa, por toda a amizade e por estarem ao meu lado em todos os momentos.

Ao meu esposo Hudson Salatiel Marques Vale, por ser fundamental e estar presente em todas as minhas conquistas, por contribuir de forma singular para o desenvolvimento desta pesquisa. Muito obrigada pelo amor, carinho, paciência e dedicação.

A todos os meus familiares pela presença constante e por acreditarem sempre na minha capacidade.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), a qual devo toda a minha formação acadêmica.

Ao Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista, pelo forma valiosa e ímpar de orientação, pelos ensinamentos transmitidos que irei guardar para a vida. Por ser um exemplo de professor, orientador e, acima de tudo, de pessoa. Obrigada pela confiança!

À amiga, Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa, por estar sempre disposta a ajudar, pelas dicas e todo apoio no decorrer da pesquisa.

Aos demais membros da banca examinadora, Dra. Kaline Dantas Travassos, Prof. Dr. Alex Pinheiro Feitosa e Prof.ª Dra. Anne Gabriella Dias Santos, pelas sugestões e contribuições para melhoria da presente pesquisa.

Às colegas Valécia Dantas de Sousa, pelo auxílio nas coletas da água produzida; Audilene Dantas da Silva, pela ajuda nas análises laboratoriais e Joseane Dunga da Costa, pela contribuição na elaboração das imagens.

À Empresa de Pesquisa Agropecuária (EMPARN/Apodi), em especial ao Sr. Jorge Ferreira Torres, pela disponibilidade em conceder as raquetes de palma forrageira utilizadas na pesquisa.

Aos funcionários do Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP/UFERSA), especialmente, Paula Romyne de Morais Cavalcante, Ana Kaline da Costa Ferreira e Elídio Andrade Barbosa.

Aos meus amigos, em especial à Larissa Luanna, Raimundo Júnior, Luiz Eduardo, Priscila Monique, Eduardo Bruno, Tayd Dayvison, Laura Carlos, Sanary Dias e Paulo César (*in memoriam*), pela amizade e por sempre me apoiarem.

À todas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada!

“Sem sonhos, a vida não tem brilho. Sem metas, os sonhos não têm alicerces. Sem prioridades, os sonhos não se tornam reais. Sonhe, trace metas, estabeleça prioridades e corra riscos para executar seus sonhos. Melhor é errar por tentar do que errar por omitir.”

Augusto Cury

RESUMO

COSTA, D. O. Utilização de água produzida do petróleo na produção e capacidade de fitoextração de cactácea no semiárido brasileiro. 2019. 135f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

A água doce é um recurso essencial para o funcionamento e desenvolvimento pleno das plantas; no entanto, apresenta-se cada vez mais escasso. A reutilização de águas residuárias na produção de espécies forrageiras surge como uma importante fonte hídrica alternativa, principalmente em regiões que se caracterizam por elevada escassez hídrica e adversidades climáticas, como é o caso do semiárido brasileiro. O presente estudo teve por objetivo analisar os efeitos de diluições de água produzida tratada no cultivo da palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick) e nas características físico-químicas do solo. Para isso, montou-se uma área experimental em casa de vegetação, no Departamento de Ciências Agrárias e Florestais do Centro de Ciência Agrárias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados (DBC) com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos avaliados foram T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 - 25% de AS e 75% de AP e T5 - 100% de AP. Para a implantação do experimento foram utilizados vasos de 20 L preenchidos com brita (nº 1) cobrindo a base dos mesmos, e com solo (Argissolo) da Fazenda Experimental Rafael Fernandes, em Mossoró. Durante o período experimental, realizou-se a caracterização físico-química da água produzida tratada oriunda de um campo petrolífero e da água subterrânea. Aos 240 dias após o plantio (DAP) foram avaliadas as características físico-químicas do solo. Para a produtividade, características agronômicas, acúmulo de nutrientes nos cladódios e nas raízes, fatores de translocação e bioacumulação, analisou-se os efeitos dos tratamentos. Os dados foram submetidos à análise de variância, testes de média e contrastes ortogonais, utilizando-se o programa computacional estatístico Sisvar 5.6 (Sistema para Análise de Variância). O cultivo de palma forrageira irrigada com água produzida tratada mostrou-se viável. Os teores de Na^+, Cl^-, CO_3^{2-} e HCO_3^- encontrados nas diluições de água produzida tratada podem limitar a utilização dessa água para fins de irrigação. Em relação aos atributos físico-químicos do solo, os valores de Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, PST, Cr e Pb foram influenciados, significativamente, pelas aplicações de água produzida tratada diluída; entretanto, ocorreu aumento significativo com as diluições apenas para os teores de Mg^{2+}, Cr e Pb. A aplicação de água produzida tratada promoveu elevação dos teores de Ca, Fe, Cu, Cr, Ni e Cd nos cladódios e de K, Mg, Mn, Zn, Pb, Cd e Ni nas raízes da palma forrageira, quando comparados os tratamentos T1 e T5. O tratamento T3 promoveu altura das plantas e espessura dos cladódios superiores, além de elevações nas produções de matéria verde e matéria seca, evidenciando que a dose aplicada de 50% de água produzida tradada consegue atender de forma satisfatória as necessidades da cultura. A palma forrageira apresentou eficiência na translocação dos elementos K, Ca, Mg, Mn, Zn, Ni, Cd e Pb da raiz para a parte aérea, e na bioacumulação de todos os nutrientes analisados em seus tecidos (raízes e cladódios), sendo o acúmulo de K, Fe, Mn e Cu mais expressivo quando comparado aos demais.

Palavras-chave: Água residuária. Fitoremediação. Impactos. Solo. Planta.

ABSTRACT

COSTA, D. O. Utilization of produced water from petroleum in the production and capacity of phytoextraction of cactaceous in the brazilian semiarid region. 2019. 135f. Thesis (Doctor of Science in Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

Fresh water is an essential resource for the full functioning and development of plants; however, is becoming increasingly scarce. The reutilization of wastewater in the production of forage species appears as an important alternative water source, especially in regions characterized by high water scarcity and climatic adversities, as is the case of the Brazilian semi-arid region. The objective of the present study was to analyze the effects of dilutions of treated water treated on forage palm (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick) and soil physical-chemical characteristics. For this, an experimental area was set up in a greenhouse, in the Department of Agrarian and Forestry Sciences of the Agricultural Science Center of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA). The experiment was carried out in randomized blocks (DBC) with five treatments and five replications. The treatments evaluated were T1 - 100% of underground water (UW), T2 - 75% of UW and 25% of treated produced water treated (PW), T3 - 50% of UW and 50% of PW, T4 - 25% of UW and 75% PW and T5 - 100% PW. For the implantation of the experiment 20 L pots filled with gravel (No. 1) were used covering the base, and with soil (Argisol) of the Rafael Fernandes Experimental Farm, in Mossoró. During the experimental period, the physico-chemical characterization of treated water from an oil field and groundwater was carried out. After 240 days after planting (DAP) were evaluated the chemical characteristics of the soil. For the productivity, agronomic characteristics, accumulation of nutrients in cladodes and roots, translocation factors and bioaccumulation, the effects of the treatments were analyzed. The data were submitted to analysis of variance, mean tests and orthogonal contrasts, using the Sisvar statistical software 5.6 (System for Analysis of Variance). Cultivation of forage palm irrigated with treated treated water proved viable. The contents of Na^+, Cl^-, CO_3^- and HCO_3^{2-} found in the treated produced water dilutions may limit the use of such water for irrigation purposes. In relation to the physical-chemical attributes, the values of Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, PST, Cr and Pb were influenced significantly by water treated applications diluted produced; however, there was a significant increase with the dilutions only for Mg^{2+}, Cr and Pb contents. The application of treated water promoted increase of Ca, Fe, Cu, Cr, Ni and Cd levels in cladodes and of K, Mg, Mn, Zn, Pb, Cd and Ni in roots of forage palm, when compared T1 and T5 treatment. The T3 treatment promoted plant height and thickness of the upper cladodes, as well as increases in green matter and dry matter production, showing that the applied dose of 50% of the produced water can meet the crop needs satisfactorily. The forage palm presented efficiency in the translocation of the elements K, Ca, Mg, Mn, Zn, Ni, Cd and Pb from the root to the aerial part, and in the bioaccumulation of all the nutrients analyzed in their tissues (roots and cladodes), accumulation of K, Fe, Mn and Cu more expressive when compared to the others.

Key words: Wastewater. Phytoremediation. Impacts. Soil. Plant.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Ranking de países por produção de petróleo no mundo – ano 2017 4

Tabela 2. Padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos segundo a Resolução CONAMA n° 430/2011 11

Tabela 3. Valores orientadores para solos e para águas subterrâneas. 13

Tabela 4. Valores orientadores para reuso de efluentes não sanitários para fins agrícolas e florestais e para fins ambientais, de acordo com a Resolução COEMA n° 2/2017 do Estado do Ceará 17

Tabela 5. Qualidade de água de irrigação relacionada à fitotoxicidade das plantas 19

Tabela 6. Características físicas iniciais do solo utilizado no experimento 32

Tabela 7. Características físico-químicas iniciais do solo utilizado no experimento 33

Tabela 8. Lâminas de água produzida tratada (AP) e da água subterrânea (AS) utilizadas na irrigação da palma, ao longo do período experimental 39

Tabela 9. Valores médios e desvio padrão das características físico-químicas referentes às diluições da água produzida tratada, em comparação com valores padrões estabelecidos pela legislação ambiental e outros autores 55

Tabela 10. Atributos físico-químicos do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 61

Tabela 11. Atributos químicos do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 72

Tabela 12. Estado nutricional dos cladódios de palma forrageira avaliados aos 240 dias após o plantio 79

Tabela 13. Estado nutricional das raízes de palma forrageira avaliadas aos 240 dias após o plantio 85

Tabela 14. Características produtivas e morfométricas da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 90

Tabela 15. Fator de translocação (FT) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida em água subterrânea 93

Tabela 16. Fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida em água subterrânea 97

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Representação esquemática da exploração e obtenção de petróleo e gás, bem como a da formação de água produzida no reservatório (A). Processo de refino do petróleo que dá origem às águas residuárias do processo (B) 6

Figura 2. Mapa geral do RN com o georreferenciamento das propriedades com palma forrageira 23

Figura 3. Localização da área experimental 29

Figura 4. Ilustração da palma forrageira cv. Miúda em campo, na estação experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) 31

Figura 5. Cladódios de palma forrageira cv. Miúda deixados em repouso, à sombra, por um período de 13 dias na Sala de Preparo de Amostras de Plantas do LASAPSA 32

Figura 6. Esquema do delineamento experimental adotado para os ensaios de produção da palma forrageira com água produzida tratada em casa de vegetação 34

Figura 7. Vista transversal do esquema experimental adotado para os ensaios de produção da palma forrageira com diluições de água produzida tratada 35

Figura 8. Palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em casa de vegetação 36

Figura 9. Valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) e temperatura média do ar obtidas durante o período experimental 38

Figura 10. Mensurações de crescimento da palma forrageira, utilizando fita métrica (A) e paquímetro (B) 43

Figura 11. Coleta do sistema radicular da palma, após o corte dos cladódios primários e secundários 44

Figura 12. Coleta de amostras simples do solo utilizado no experimento, com auxílio de trado holandês 47

Figura 13. Valores de pH (A), CE_{es} (B), MO (C) e P (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados 65

Figura 14. Valores de K (A), Na (B), Ca (C) e Mg (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados 67

Figura 15. Valores de H + Al (A), CTC (B) e PST (C) do solo, em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados 70

Figura 16. Valores de Fe (A), Mn (B), Cu (C) e Zn (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados 75

Figura 17. Valores de Cr (A), Ni (B), Cd (C) e Pb (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados 77

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AMC	Altura Média dos Cladódios
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AP	Água Produzida Tratada
ARS	Água Residuária da Suinocultura
AS	Água Subterrânea
BPS	Bactérias Produtoras de Sulfeto
BRS	Bactérias Redutoras de Sulfato
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
CAERN	Companhia de Águas e Esgostos do Rio Grande do Norte
CAM	Crassulasean Acid Metabolism
CE	Condutividade Elétrica
CFSEMG	Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
COT	Carbono Orgânico Total
CT	Coliformes Termotolerantes
CTC	Capacidade de Troca Catiônica
CUD	Coeficiente de Uniformidade de Distribuição
CV	Coeficiente de Variação
DAP	Dias Após o Plantio
DBC	Delineamento em Blocos Casualizados
DCAF	Departamento de Ciências Agrárias e Florestais
DQO	Demanda Química de Oxigênio
EMC	Espessura Média dos Cladódios
EMPARN	Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte
ET_0	Evapotranspiração de Referência
ETc	Evapotranspiração da Cultura
FB	Fator de Bioacumulação

FT	Fator de Translocação
H	Altura da Planta
HAP	Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos
IAC	Índice de Área do Cladódio
IDIARN	Instituto de Defesa e Inspeção Agropecuária do Rio Grande do Norte
INSA	Instituto Nacional do Semiárido
Kc	Coeficiente de Cultura
LASAP	Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta
LASAPSA	Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do Semiárido
LMC	Largura Média dos Cladódios
LQA	Laboratório de Qualidade Ambiental
MO	Matéria Orgânica
MSC	Massa Seca dos Cladódios
MUC	Massa Úmida dos Cladódios
NBR	Normas Brasileiras
NCP	Número de Cladódios por Planta
NFD	Naftalenos, Fenotrenos e Dibenzotiofenos
NMP	Número Mais Provável
pH	Potencial Hidrogeniônico
PMC	Perímetro Médio dos Cladódios
PST	Porcentagem de Sódio Trocável
Q	Vazão
RAS	Razão de Adsorção de Sódio
SB	Soma de Bases
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
TOG	Teor de Óleos e Graxas
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 1
2 OBJETIVOS 3
2.1 Objetivo geral 3
2.2 Objetivos específicos 3
3 REVISÃO DE LITERATURA 4
3.1 Produção de petróleo no Brasil 4
3.2 Origem e geração da água produzida de petróleo 5
3.3 Características qualitativas e quantitativas da água produzida 7
3.4 Legislação aplicada ao lançamento e descarte da água produzida 9
3.5 Efeitos da aplicação de águas residuárias no solo e nas plantas 14
3.6 Qualidade da água para irrigação 17
3.7 Irrigação de cultivos agrícolas com água produzida de petróleo 20
3.8 Processo de fitoextração 21
3.9 Introdução da palma forrageira no Rio Grande do Norte 22
3.10 Características morfofisiológicas da palma forrageira 25
3.11 Irrigação no cultivo e manejo da palma forrageira 26
4 MATERIAL E MÉTODOS 29
4.1 Localização da área experimental e clima da região 29
4.2 Origem da água produzida de petróleo e da água subterrânea 30
4.3 Caracterização da palma forrageira utilizada nos ensaios experimentais 31
4.4 Caracterização do solo utilizado no experimento 32
4.5 Instalação e condução do experimento 33
4.5.1 Parcelas experimentais e tratamentos 33
4.5.2 Caracterização do sistema de irrigação e de seu manejo ao longo do período experimental 34
4.5.3 Implantação do experimento 36
4.6 Variáveis analisadas 39
4.6.1 Caracterização das diluições de água produzida tratada 39
4.6.2 Determinação das características morfométricas e produtivas da palma forrageira irrigada com água produzida tratada e água subterrânea 42
4.6.3 Caracterização do estado nutricional da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada 43
4.6.4 Monitoramento dos atributos físico-químicos do solo após aplicação das diluições de água produzida tratada 46

4.6.5 Determinação do fator de translocação (FT) e fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada 51

4.7 Experimentação e análises estatísticas..... 52

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 55

5.1 Caracterização físico-química das diluições de água produzida tratada em água subterrânea 55

5.2 Avaliação dos atributos físico-químicos do solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 59

5.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), matéria orgânica (MO) e fósforo (P) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 64

5.2.2 Potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 66

5.2.3 Acidez potencial (H + Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de sódio trocável (PST) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 69

5.3 Micronutrientes e metais pesados no solo após irrigação com água produzida tratada diluída em água subterrânea 70

5.3.1 Ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 74

5.3.2 Cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 76

5.4 Estado nutricional da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 78

5.4.1 Acúmulo de nutrientes nos cladódios..... 78

5.4.2 Acúmulo de nutrientes nas raízes 84

5.5 Características produtivas e morfométricas da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 89

5.6 Capacidade fitoextratora da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea..... 92

5.6.1 Fator de translocação (FT) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 92

5.6.2 Fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea 96

6 CONCLUSÕES..... 101

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 102

1 INTRODUÇÃO

A intensificação da escassez de água é um problema que vem sendo enfrentado em todo o mundo (Bichai et al., 2012). O Brasil tem uma grande quantidade de água doce, mas a maioria das reservas está concentrada na região amazônica, enquanto outras regiões que fazem fronteira com o Oceano Atlântico, especialmente o Nordeste, apresentam baixa disponibilidade (Bressiani et al., 2015).

As causas da escassez são uma combinação de diversos fatores: distribuição de água ineficiente, nenhum plano de emergência ou estrutura básica para enfrentar os períodos chuvosos ou aproveitá-los de forma mais eficiente, tratamento e aproveitamento das águas residuárias, degradação dos recursos ambientais, mudanças climáticas, entre outros (Urbano et al., 2017).

A agricultura irrigada responde por cerca de 70% do consumo global de água fresca (Siebert et al., 2010). Consequentemente, devido à alta demanda agrícola de água disponível e à necessidade de evitar sua deterioração, torna-se necessário considerar a reutilização de água de baixa qualidade na produção agrícola (Sousa et al., 2017), o que pode causar impactos ambientais positivos e negativos ao meio ambiente.

Fontes alternativas de água vêm sendo sugeridas para a irrigação, sendo que a maioria das informações disponíveis na literatura estão associadas principalmente a estudos realizados com águas residuárias domésticas (Batista et al., 2017; Urbano et al., 2017; Elfanssi et al., 2018) e industriais (Medeiros et al., 2015; Nascimento et al., 2016). Poucas são as informações sobre águas residuárias obtidas em campos petrolíferos (água produzida) na agricultura, que, depois de tratada, pode ser uma opção atraente, especialmente em regiões semiáridas.

No campo petrolífero Potiguar, localizado na região Nordeste brasileira, a proporção média de água produzida para 2012, 2013 e 2014 foi de 95%, enquanto que para o petróleo foi de 5%, gerando um volume médio de 4.139.864 m^3 de água produzida por ano (ANP, 2016a).

A água produzida pode conter elevadas concentrações de óleo disperso, sólidos dissolvidos totais, metais pesados, compostos químicos residuais da produção, sólidos da produção, gases dissolvidos e microrganismos (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

Por apresentar tais características, esta não deve ser descartada em grandes volumes na superfície e nem ser reutilizada sem tratamento, pois podem afetar negativamente as propriedades do solo, causando o acúmulo de metais pesados e sais em níveis tóxicos no solo e no tecido vegetal das plantas, além de alterar o pH do solo (Crisóstomo et al., 2016).

Entretanto, quando adequadamente tratada, a água produzida pode ser utilizada na irrigação de culturas cujos produtos não se destinam diretamente ao consumo humano, suprindo, em parte, a falta de fontes d'águas naturais, além de elevar os teores de nutrientes no solo e na planta (Pereira et al., 2011) e de matéria orgânica no solo (Xu et al., 2010).

Dessa forma, o uso da água produzida na irrigação vem sendo estudado por diversos autores a fim de avaliar os efeitos dessa água no solo e no crescimento e produção de culturas como oleaginosas e flores ornamentais (Pinheiro et al., 2014b; Sousa et al., 2017), gramíneas e colza (Pica et al., 2017).

Nesse contexto, a palma forrageira (*Nopalea cochenillifera)* aparece como alternativa de cultivo, adaptada às condições edafoclimáticas do semiárido, visto ser uma cultura com mecanismo fisiológico especial no que se refere à absorção, aproveitamento e perda de água (Silva et al., 2014). Além disso, apresenta alta produtividade e constitui-se em uma importante ferramenta no manejo e proteção do solo (Lima et al., 2015).

A presente pesquisa torna-se inédita, visto que inexistem, no Brasil e no mundo, experimentos voltados para o uso de água produzida obtida em campos petrolíferos na irrigação da palma forrageira.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar os efeitos de diluições de água produzida tratada no cultivo da palma forrageira (*Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick) e nas características físico-químicas do solo.

2.2 Objetivos específicos

a) Caracterizar físico-quimicamente as diluições de água produzida tratada utilizadas no experimento;
b) Monitorar as alterações nos atributos físico-químicos de um Argissolo pela aplicação de diluições de água produzida tratada em água subterrânea;
c) Verificar os efeitos da água produzida tratada nas características produtivas e morfométricas da palma forrageira;
d) Avaliar a capacidade de fitoextração de nutrientes na palma irrigada com diluições de água produzida tratada; e,
e) Recomendar o nível de diluição da água produzida tratada mais adequado para o cultivo da palma forrageira em Argissolo.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Produção de petróleo no Brasil

O consumo global de energia cresce a cada ano (Davidson et al., 2014) e, em função disso, cresce também a produção de petróleo e gás. Conforme Gomes (2014), o petróleo é uma fonte energética fundamental para muitos países, uma vez que serve de insumo para inúmeros setores industriais como automobilístico, têxtil, agrícola, químico, dentre outros.

Devido aos seus diversos derivados (gás liquefeito, gasolina, querosene, óleo combustível, diesel, combustível marinho, nafta, entre outros), possui vasta aplicabilidade, tornando-se uma matéria-prima de difícil substituição em curto prazo (Almada & Parente, 2013). A disponibilidade do petróleo e seus preços de mercado afetam diretamente a economia e o nível de crescimento dos países (Hernandez-Perez, 2011), uma vez que energia e transporte são insumos necessários à produção de quaisquer bens ou serviços.

No Brasil, o volume de petróleo produzido em 2017 foi de 2,734 milhões de barris de petróleo por dia, sendo equivalente a 2,95% da produção mundial, ocupando a décima posição no ranking mundial de acordo com a Tabela 1 (ANP, 2018).

Tabela 1. Ranking de países por produção de petróleo no mundo – ano 2017

Posição	**Países**	**Produção de petróleo - Ano 2017 (milhões de barris dia^{-1})**	**Participação mundial (%)**
1º	Estados Unidos	13,057	14,09
2º	Arábia Saudita	11,951	12,90
3º	Rússia	11,257	12,15
4º	Irã	4,982	5,38
5º	Canadá	4,831	5,21
6º	Iraque	4,520	4,88
7º	Emirados Árabes Unidos	3,935	4,25
8º	China	3,846	4,15
9º	Kuwait	3,025	3,27
10º	Brasil	2,734	2,95
11º	México	2,224	2,40
12º	Venezuela	2,110	2,28

Fonte: Adaptado de ANP (2018).

No país, a região Nordeste tem algumas bacias sedimentares com centenas de campos petrolíferos, das quais cerca de 44 milhões de barris de petróleo são extraídos anualmente (ANP, 2016a). A Bacia Potiguar está localizada no extremo leste da Margem Equatorial

Brasileira, estando sua maior parte no Estado do Rio Grande do Norte, e uma pequena parte no Estado do Ceará. Sua área é de 222.699 km^2, dos quais 195.974 km^2 correspondem à porção submersa, até o limite das águas territoriais brasileiras. Seu limite geológico a oeste é o Alto de Fortaleza, que a separa da Bacia do Ceará. Já o Alto de Touros marca seu limite geológico a leste, separando-a da Bacia de Pernambuco-Paraíba. Ao Sul, a bacia se assenta sobre o embasamento pré-cambriano da Província Borborema. A espessura sedimentar atinge até 6.000 metros (Batista, 2017).

A área sedimentar na porção emersa da bacia é classificada como madura (Portella & Fabianovicz, 2017). Campos de produção maduros produzem altos volumes de água e a destinação final dessa água é um fator limitante do aumento da produção de óleo na companhia, principalmente para campos produtores terrestres (Pinheiro et al., 2014b).

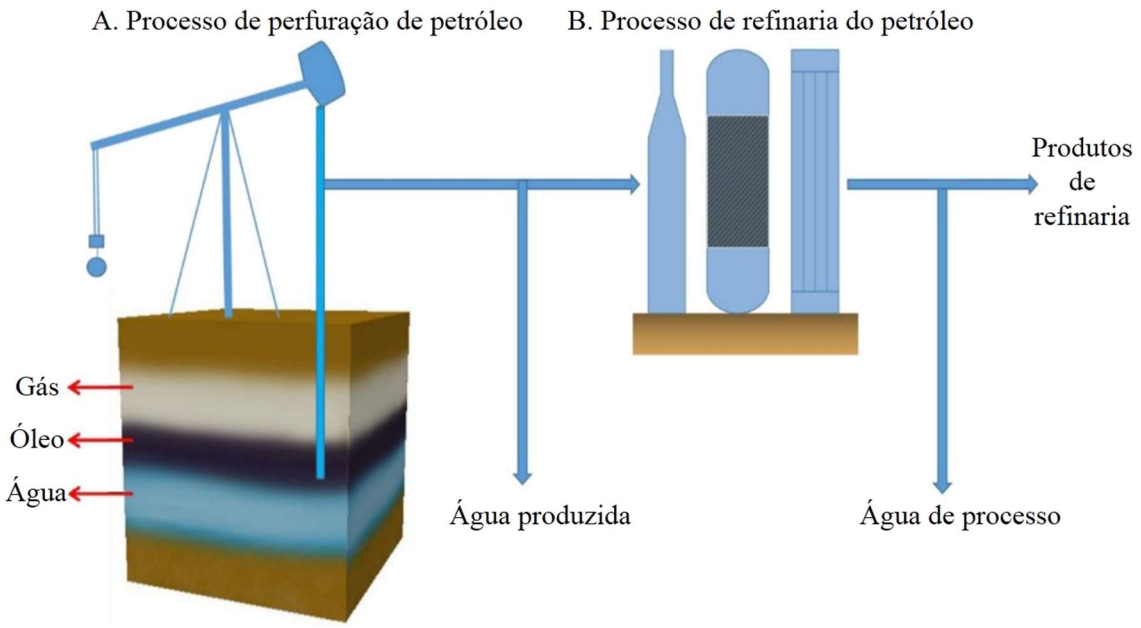
O período entre 1980 a 1990 corresponde à fase de maior investimento exploratório na bacia. Foram perfurados 675 poços exploratórios, os quais representam aproximadamente 52% do total perfurado na bacia até o momento. Dados de agosto de 2017 indicam que a Bacia Potiguar conta com 94 campos de produção e em desenvolvimento e atualmente produz um total de 47.715 barris de petróleo por dia (Batista, 2017).

O Estado do Rio Grande do Norte ocupa posição de destaque no país, sendo o quarto estado com maior produção de petróleo em solo e mar, gerando 17,301 milhões de barris no ano de 2018. Além disso, é o estado brasileiro com maior produção de petróleo em solo, gerando 15,205 milhões de barris (ANP, 2018).

3.2 Origem e geração da água produzida de petróleo

Semelhante a muitas outras atividades de exploração e produção, a indústria do petróleo produz grandes quantidades de resíduos e efluentes. O maior volume de efluente gerado nesse tipo de atividade é a água produzida, sendo esta uma mistura de água de formação natural (em maior quantidade) existente abaixo ou dentro do reservatório de petróleo e gás, de água reinjetada e de produtos químicos utilizados durante as etapas de perfuração, estimulação, produção e processos de separação óleo-água (Santos et al., 2014; Drioli et al., 2016).

O volume de água produzida geralmente aumenta com a idade do reservatório e, em certos casos, pode atingir até 98% do volume total de fluido (Igunnu & Chen, 2012; Alzahrani & Mohammad, 2014). A fonte típica de água produzida é representada na Figura 1A.



Fonte: Adaptado de Igunnu & Chen (2012).

Figura 1. Representação esquemática da exploração e obtenção de petróleo e gás, bem como a da formação de água produzida no reservatório (A). Processo de refino do petróleo que dá origem às águas residuárias do processo (B)

Todo o petróleo bruto e gás recuperados são submetidos ao processamento de refinaria antes do uso final. Os processos de refinação do petróleo e gás também produzem uma grande quantidade de águas residuárias, geralmente chamada de água de processo (Figura 1B). A principal diferença entre a água produzida e a água de processo é que a primeira contém a maioria dos íons minerais dissolvidos, enquanto que a segunda geralmente contém íons inorgânicos (minerais) menos dissolvidos (Munirasu et al., 2016). Em geral, a água produzida contém alto teor de sal, enquanto que a água de processo da refinaria contém um teor de material orgânico elevado (Fakhru'l-Razi et al., 2009; Igunnu & Chen, 2012; Olsson et al., 2013).

Conforme Munirasu et al. (2016), geralmente é conhecida uma proporção de 3:1, relação água/óleo, para a maioria dos poços de petróleo. Segundo Morais (2013), as operações *offshore* no Brasil, registraram a geração de cerca de 95 milhões de m^3 de água produzida, para uma produção de 107 milhões de m^3 de petróleo, resultando em uma razão água-óleo de 0,89:1. Comparando a média global (3:1) mencionada anteriormente com a produção brasileira, é observada uma diferença significativa, podendo ser justificada pela idade da maioria dos campos brasileiros e início da atividade de exploração e produção no Brasil, mais recente do que diversos outros países, uma vez que se trata apenas dos dados da atividade *offshore*.

Globalmente, a quantidade estimada de água produzida aumentou mais de 78% entre 1990 e 2015, de cerca de 10,6 bilhões para 18,9 bilhões de m^3, em comparação com 38% de crescimento da produção de petróleo de 3,7 bilhões para 5,1 bilhões de m^3, respectivamente (SPE, 2011; BP, 2017). Estima-se que em 2020 o volume de água produzida, apenas em campos *onshore*, atinja cerca de 29 bilhões de m^3 (Stanic, 2014; BP, 2017).

Justificadamente, uma das principais preocupações em províncias petrolíferas maduras (como é o caso da Bacia Potiguar), concomitante à preocupação com a continuidade do funcionamento dos poços (receita), é o gerenciamento desta água (custo). O petróleo e o gás são os produtos de valor comercial (ativo), enquanto a água é um resíduo da produção (passivo). Essa água pode causar consideráveis impactos ao meio ambiente ou à própria operação, se negligenciadas as técnicas de gerenciamento, que demanda conhecimento em diferentes áreas (Vieira, 2016).

3.3 Características qualitativas e quantitativas da água produzida

A composição e as características qualitativas e quantitativas das substâncias de ocorrência natural na água produzida estão intimamente ligadas às características geológicas de cada reservatório (Neff et al., 2011). Sua composição é complexa e pode incluir milhares de compostos que variam em concentração entre os poços produtores de petróleo, ao longo da sua vida útil (Amini et al., 2012).

A água produzida é uma emulsão óleo-em-água, onde a fase oleosa está dispersa na fase aquosa, estabilizada por agentes tensoativos (Sheng, 2011). Entre os principais compostos constituintes da água produzida, destacam-se:

- Óleo total: a concentração de óleo total na água produzida pode variar desde valores relativamente baixos, como de 50 a 600 mg L^{-1} (Qiao et al., 2008), até mais elevados, superiores a 1000 mg L^{-1} (Chakrabarty et al., 2008), sendo necessário o seu tratamento. Entre os fatores que influenciam nesses teores estão a eficiência de desemulsificação (no processo de tratamento primário), o tipo de óleo (Chakrabarty et al., 2008) e o processo utilizado na extração do petróleo (Qiao et al., 2008). Deve-se ressaltar que o óleo da água produzida é formado por uma mistura de vários compostos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), naftalenos, fenantrenos e dibenzotiofenos (NFD), hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HAP) e fenóis. Os hidrocarbonetos são altamente insolúveis na água, de modo que a maior parte do óleo presente na água produzida está sob a forma dispersa (Motta et al., 2013). Dentre os principais compostos orgânicos presentes

na água de produção, representam a sua maioria os hidrocarbonetos de petróleo, ácidos carboxílicos e fenóis (Neffet al., 2011).

- Minerais dissolvidos da formação: inclui os sólidos dissolvidos totais (SDT) que são constituintes orgânicos compostos por cátions (Na^+, K^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Ba^{2+}, Sr^{2+} e Fe^{2+}) e ânions (Cl^-, SO_4^{2-}, CO_3^{2-} e HCO_3^-). Desses, geralmente predominam o Na^+ e o Cl^-. A concentração de SDT na água produzida varia de valores menores que 100 até 300 000 mg L^{-1}, dependendo da localização geográfica e da idade e tipo do reservatório de petróleo (Stewart & Arnold, 2011). A salinidade da água produzida, portanto, pode variar de valores abaixo dos usualmente requeridos para a água potável (250 mg L^{-1} para cloretos) até muito maiores do que o da água do mar (35 000 mg L^{-1}), o que ocorre na maioria dos diferentes campos de produção, devido à dissolução do sal das formações rochosas durante o período de represamento, contribuindo para o alto potencial de toxicidade deste efluente e tornando-o mais denso que a água do ambiente marinho (Farag & Harper, 2014).
- Metais pesados: a água produzida pode conter, ainda, traços de vários metais, como cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, prata e zinco; e materiais radioativos de ocorrência natural (MRON), principalmente o rádio, que é o co-precipitado da água produzida juntamente com outros tipos de incrustações (Motta et al., 2013). Os radionuclídeos mais comuns são os elementos radioativos naturais Rádio-236 e Rádio-238 (^{236}Ra e ^{238}Ra). Estes são derivados do decaimento do Urânio-238 e Tório-232 associados com certas rochas e argilas do reservatório de petróleo. Quando comparada a atividade de ^{236}Ra e ^{238}Ra na água de produção e na água do mar, nota-se uma atividade muito mais elevada noprimeiro efluente mencionado (Hosseiniet al., 2012).
- Compostos químicos residuais da produção: são originados dos compostos usados para tratar ou para prevenir problemas operacionais durante a produção de petróleo, como inibidores de incrustação e de corrosão, biocidas, desemulsificadores, aditivos para o tratamento da água (coagulantes e floculantes) e químicos tratadores de gás. Estes produtos químicos podem ser utilizados para auxiliar na recuperação e bombeamento de hidrocarbonetos, proteger o sistema de corrosão, facilitar a separação do óleo, gás e água e prevenir a formação de hidrato de metano (gelo) no sistema de produção, danificando-o (Fakhru'l-Raziet al., 2009).
- Sólidos da produção: são constituídos por uma alta variedade de compostos como sólidos da formação (areia, silte, argila e carbonatos), produtos de corrosão e incrustação, bactérias, ceras e asfaltenos (Motta et al., 2013).
- Gases dissolvidos: os gases mais comumente encontrados na água produzida são gás natural (metano, etano, propano e butano), CO_2 e H_2S. O H_2S pode estar presente

naturalmente ou ser produzido por bactérias redutoras de sulfato (BRS); além disso, pode causar incrustação por sulfeto de ferro e ser tóxico, se inalado. O O_2 não é encontrado naturalmente na água produzida. Quando a água produzida é trazida à superfície, esse gás é, então, incorporado à sua composição, o que pode causar problemas como torná-la corrosiva e produzir sólidos insolúveis, devido a reações de oxidação. O CO_2 pode estar presente naturalmente e pode ser corrosivo ou se precipitar como $CaCO_3$. A remoção de CO_2 e H_2S gera um aumento no pH, podendo gerar precipitados (Stewart & Arnold, 2011).

- Microrganismos: devido à elevada presença de elementos tóxicos na água produzida, poucos microrganismos podem sobreviver (Fakhru'l-Razi et al., 2009). Ainda assim, podem ocorrer BRS e bactérias anaeróbias, de modo geral. Durante o armazenamento de petróleo em grandes tanques, a população de bactérias produtoras de sulfeto (BPS) aumenta. O sulfato de hidrogênio produzido pelas BPS e pelas BRS reage com o ferro quando ele está disposto nos poços, gerando um precipitado e causando incrustações nos reservatórios (Kaur et al., 2009).

Esses compostos, citados anteriormente, necessitam ser parcialmente removidos antes do descarte ou reuso com a finalidade de recuperação secundária do petróleo (Judd et al., 2014).

O teor de óleos e graxas (TOG) é um dos parâmetros que merecem maior atenção para instalações *onshore* (em terra) e *offshore* (no mar). No caso das primeiras, o descarte de água produzida em corpos hídricos superficiais é geralmente proibido, exceto para casos em que a sua salinidade é baixa. O descarte da água produzida com salinidade elevada nos cursos d'água pode matar a fauna e flora aquática (Stewart & Arnold, 2011).

3.4 Legislação aplicada ao lançamento e descarte da água produzida

Os grandes volumes de descarga geral, o conteúdo complexo de produtos químicos parcialmente perigosos e a falta de conhecimento sobre possíveis impactos ecológicos à longo prazo, fizeram do tratamento e destinação final da água produzida o objetivo mais forte de preocupação e pesquisa nos últimos anos (Bakke et al., 2013).

Vazões significativas de água são co-produzidas com produtos petrolíferos e, se não forem devidamente manipuladas, representam fonte potencial de contaminação para o meio ambiente (Skalak et al., 2014). No entanto, a alternativa a ser adotada para tratamento e destino da água produzida depende de vários fatores, tais como: localização da base de produção, legislação, viabilidade técnica, custos e disponibilidade de infraestrutura e de equipamentos (Motta et al., 2013).

As principais alternativas para o gerenciamento da água produzida são: a) o descarte no ambiente após tratamento visando atender aos regulamentos da legislação vigente; b) a reinjeção na mesma formação geológica a partir da qual o óleo foi extraído ou em outra formação; c) a reutilização na exploração de petróleo e gás; d) o reuso, após o devido tratamento para atender à qualidade exigida, na irrigação de cultivos, restauração de áreas vegetais e produção animal (Crisóstomo et al., 2016).

Nos campos marítimos de produção de petróleo, a água produzida é tratada e descartada no mar. Já nos poços terrestres de produção de petróleo, a maior parte da água produzida é reinjetada nas formações subterrâneas, o que pode levar à redução da sua produção (Motta et al., 2013).

O descarte deve ser realizado de modo a atender a legislação. No caso de plataformas marítimas no Brasil, o descarte deve atender a Resolução CONAMA nº 393/2007 (Brasil, 2007), sendo esta a única resolução voltada especificamente para a regulamentação de padrões e práticas relacionados à água produzida. O principal parâmetro monitorado é o teor de óleos e graxas (TOG), cujo valor permitido deve ser de 29 mg L^{-1}, para a média aritmética simples mensal, e 42 mg L^{-1}, para o valor máximo diário. Ainda conforme esta Resolução, é vedado o descarte de água produzida em um raio inferior a dez quilômetros de unidades de conservação e a cinco quilômetros de áreas ecologicamente sensíveis.

No caso de proximidades do litoral, o descarte no Brasil deve atender à Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005) atualizada na Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011a) que dispõe sobre os parâmetros, padrões e diretrizes para a gestão do lançamento de efluentes em corpos hídricos receptores. Entre as condições está o teor de óleos e graxas, cujo limite máximo permitido deve ser de 20 mg L^{-1}.

Na Tabela 2 estão apresentados os padrões de lançamento de efluentes de qualquer fonte poluidora em corpos receptores.

Tabela 2. Padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos segundo a Resolução CONAMA n° 430/2011

Parâmetros inorgânicos	**Valores máximos**
Arsênio total	0,5 mg L^{-1} As
Bário total	5,0 mg L^{-1} Ba
Boro total (Não se aplica para o lançamento em águas salinas)	5,0 mg L^{-1} B
Cádmio total	0,2 mg L^{-1}Cd
Chumbo total	0,5 mg L^{-1}Pb
Cianeto total	1,0 mg L^{-1} CN
Cianeto livre (destilável por ácidos fracos)	0,2 mg L^{-1} CN
Cobre dissolvido	1,0 mg L^{-1} Cu
Cromo hexavalente	0,1 mg L^{-1} Cr^{+6}
Cromo trivalente	1,0 mg L^{-1} Cr^{+3}
Estanho total	4,0 mg L^{-1} Sn
Ferro dissolvido	15,0 mg L^{-1} Fe
Fluoreto total	10,0 mg L^{-1} F
Manganês dissolvido	1,0 mg L^{-1} Mn
Mercúrio total	0,01 mg L^{-1} Hg
Níquel total	2,0 mg L^{-1}Ni
Nitrogênio amoniacal total	20,0 mg L^{-1} N
Prata total	0,1 mg L^{-1} Ag
Selênio total	0,30 mg L^{-1} Se
Sulfeto	1,0 mg L^{-1} S
Zinco total	5,0 mg L^{-1} Zn
Parâmetros orgânicos	**Valores máximos**
Benzeno	1,2 mg L^{-1}
Clorofórmio	1,0 mg L^{-1}
Dicloroeteno (somatório de 1,1 + 1,2cis + 1,2 trans)	1,0 mg L^{-1}
Estireno	0,07 mg L^{-1}
Etilbenzeno	0,84 mg L^{-1}
Fenóis totais (substâncias que reagem com 4-aminoantipirina)	0,5 mg L^{-1} C6H5OH
Tetracloreto de carbono	1,0 mg L^{-1}
Tricloroetano	1,0 mg L^{-1}
Tolueno	1,2 mg L^{-1}
Xileno	1,6 mg L^{-1}

Fonte: Adaptado de Brasil (2011a).

No Estado do Ceará, a Resolução COEMA nº 2, de 02 fevereiro de 2017, que dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 25 de novembro de 2002 (Ceará, 2017).

Conforme as definições estabelecidas no Capítulo I desta Resolução, entende-se por: a) Efluentes sanitários: despejos líquidos residenciais, comerciais, águas de infiltração na rede

coletora, os quais podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos; e b) Efluentes não sanitários: todo e qualquer efluente que não se enquadra na definição de efluente sanitário, incluindo os despejos líquidos provenientes das atividades industriais.

De acordo com o Artigo 11 desta Resolução, fica estabelecido que os efluentes não sanitários, somente poderão ser lançados diretamente no corpo hídrico desde que obedeçam, resguardadas outras exigências cabíveis, as seguintes condições e padrões específicos:

- pH: entre 5,0 e 9,0;
- Temperatura: inferior a 40ºC;
- Materiais sedimentáveis: até 1 mL L^{-1} em teste de 1 hora em cone Inmhoff;
- Óleos minerais até 20 mg L^{-1} e óleos vegetais e gorduras animais até 50 mg L^{-1};
- Ausência de materiais flutuantes;
- Cor aparente: presença de corantes e pigmentos virtualmente ausentes;
- Sólidos suspensos totais até 100 mg L^{-1};
- NMP de coliformes termotolerantes até 5000 NMP 100 mL^{-1};
- Sulfeto até 1 mg L^{-1};
- Nitrogênio amoniacal total, da seguinte forma: a) até 20 mg L^{-1}, quando o pH for menor ou igual a 8,0; ou, b) até 5 mg L^{-1}, quando o pH for maior que 8,0;
- Sulfato até 500 mg L^{-1};
- Demanda Química de Oxigênio (DQO): até 200,0 mg L^{-1};
- Para os efluentes provenientes de lagoas de estabilização: OD > 3 mg L^{-1};
- Cianeto total: até 1,0 mg L^{-1}; e
- Cianeto livre até 0,2 mg L^{-1}.

Os parâmetros específicos orgânicos e inorgânicos para lançamento de efluentes estão de acordo com os estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 430/2011, citados anteriormente na Tabela 2.

A Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009 dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo e águas subterrâneas quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas (Brasil, 2009).

Conforme o artigo 6º dessa resolução, são adotados os seguintes termos e definições:

- Valores orientadores: são concentrações de substâncias químicas que fornecem orientação sobre a qualidade e as alterações do solo e da água subterrânea.

- Valor de prevenção: é a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais.

- Valor de investigação: é a concentração de determinada substância no solo ou na água subterrânea acima da qual existem riscos potenciais, diretos ou indiretos, à saúde humana, considerando um cenário de exposição padronizado.

Na Tabela 3 estão apresentados os valores orientadores de referência de qualidade para disposição de substâncias químicas em solos e em águas subterrâneas.

Tabela 3. Valores orientadores para solos e para águas subterrâneas.

Substâncias	Solo (mg kg^{-1} de peso seco)		Água subterrânea (µg L^{-1})
	Prevenção	Investigação	Investigação
		Agrícola APMAX	
Inorgânicos			
Alumínio	-	-	3500**
Antimônio	2	5	5*
Arsênio	15	35	10*
Bário	150	300	700*
Boro	-	-	500
Cádmio	1,3	3	5*
Chumbo	72	180	10*
Cobalto	25	35	70
Cobre	60	200	2000*
Cromo	75	150	50*
Ferro	-	-	2450**
Manganês	-	-	400**
Mercúrio	0,5	12	1*
Molibdênio	30	50	70
Níquel	30	70	20
Nitrato (como N)	-	-	10000*
Prata	2	25	50
Selênio	5	-	10*
Vanádio	-	-	-
Zinco	300	450	1050**
Hidrocarbonetos aromáticos voláteis			
Benzeno			5*
Estireno			20*
Etilbenzeno			300**
Tolueno			700**
Xilenos			500**

Nota:* Padrões de potabilidade de substâncias químicas que representam risco à saúde definidos na Portaria nº 2914/2011 do Ministério da Saúde (Brasil, 2011b). ** Valores calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta Resolução.
Fonte: Adaptado de Brasil (2009).

Preston et al. (2014) estabeleceram valores de referência de qualidade para os metais prata (Ag), bário (Ba), cádmio (Cd), cobalto (Co), cromo (Cr), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo

(Pb), antimônio (Sb), vanádio (V) e zinco (Zn) exigidos pelo CONAMA, com base no percentil 75%, para composição da legislação direcionada ao monitoramento desses elementos nos solos do Estado do Rio Grande do Norte. Os valores determinados foram os seguintes (mg kg^{-1}): Ag (0,88), Ba (58,91), Cd (0,10), Co (15,41), Cr (30,94), Cu (13,69), Ni (19,84), Pb (16,18), Sb (0,18), V (28,71) e Zn (23,85).

Como dito anteriormente, a água produzida também pode ser destinada no próprio campo, sendo reinjetada no mesmo reservatório de origem, ou injetada em outro reservatório desse mesmo campo. Geralmente, a indústria tende a adotar essa prática, por conta da oportunidade de recuperação secundária do petróleo (Vieira, 2016). Entretanto, quando não é possível, a água pode ser transferida para outros reservatórios subterrâneos de água e reservatórios não produtores de petróleo (armazenamento geológico).

No Brasil, essa prática deve atender à Resolução CONAMA nº 396/2008, que trata da classificação das águas subterrâneas. Uma das condições fixadas para esse descarte é que ele seja feito apenas em águas de classe 5, definidas como "águas dos aquíferos, conjunto de aquíferos ou porção desses que possam estar com alteração de sua qualidade por atividades antrópicas, destinadas às atividades que não têm requisitos de qualidade para uso" (Brasil, 2008).

O tratamento da água produzida para esse propósito é necessário, porque a água tem as suas características alteradas ao chegar à superfície (Bader, 2007). As especificações gerais de qualidade de água produzida para reinjeção ou para descarte em águas superficiais são de menos de 10 mg L^{-1} de SDT e menos que 42 mg L^{-1} de TOG (Bader, 2007). As limitações devem-se ao fato de que tanto o óleo quanto os SDT podem obstruir os poros da rocha-reservatório de petróleo, esses últimos ao se precipitarem quimicamente.

3.5 Efeitos da aplicação de águas residuárias no solo e nas plantas

A produção de alimentos e fibras em quantidades suficientes para satisfazer as necessidades humanas depende da tecnologia, como a irrigação, particularmente nas regiões áridas e semiáridas. Consequentemente, a alta demanda agrícola de água disponível e a necessidade de evitar sua deterioração, tornam necessário considerar a reutilização de água de baixa qualidade na produção agrícola (Sousa et al., 2017), o que pode causar impactos ambientais positivos e negativos ao meio ambiente.

Vários são os benefícios da aplicação de água residuária na produção agrícola, por terem em sua composição água e nutrientes, promove a possibilidade de substituição parcial de fertilizantes químicos, com a diminuição do impacto ambiental, em função da redução da

contaminação dos corpos hídricos; um significativo aumento na produção agrícola, tanto qualitativo quanto quantitativo; além de promover a melhoria das condições físicas do solo pela adição de matéria orgânica, ao mesmo tempo em que se resolve o problema da sua disposição final (Cabral et al., 2011).

Tavakoli & Mahdavi Moghadam (2013) relataram que a efetiva absorção de nitrogênio presente na água residuária, resultou num aumento da área foliar da cultura do milho. Já Duarte et al. (2008) afirmaram que além do teor de nitrogênio, as águas residuárias geralmente contém teores de carbono mais elevados que a água limpa, o que favorece a proliferação da biota do solo e, por sua vez, transforma o N orgânico em N assimilável às plantas.

O acúmulo de metais pesados tais como cádmio, cobre, níquel, chumbo, arsênio, cromo e zinco podem ser observados após a aplicação de águas residuárias no solo (Alderson et al., 2015). Elementos como o zinco, cobre e boro em pequenas concentrações são benéficos às culturas, contudo, podem causar problemas de toxicidade devido ao seu poder acumulativo.

Nathan et al. (2012) mostraram a capacidade das culturas de milho (*Zea mays)*, trapoeraba (*Commelina benghalensis)*, girassol (*Helianthus annuus)* e amaranto (*Amaranthus hybridus)* em bioacumular chumbo, cobre, cádmio e zinco oriundos de águas residuárias. Segundo esses autores, o girassol e a trapoeraba apresentaram um potencial para remover chumbo, cobre e cádmio, enquanto o milho e o amaranto absorverem melhor o zinco.

Prior et al. (2015) observaram que a água residuária da suinocultura propiciou aumentos significativos na produtividade, na nutrição mineral da cultura do milho para os nutrientes potássio, magnésio, ferro, cobre e boro; e na fertilidade do solo para os parâmetros fósforo, zinco, cobre, potencial hidrogeniônico (pH) e soma de bases (SB).

Se por um lado, a reutilização de águas de qualidade inferior pode suprir as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais das plantas, por outro, a ausência de controle e regulamentação desta prática pode acarretar mudanças físicas e químicas do solo, afetando sua qualidade e o desenvolvimento das culturas (Urbano et al., 2015).

O uso contínuo de águas residuárias pode causar mudanças no pH do solo, exercendo influência na disponibilidade e absorção de nutrientes por parte das plantas e na estrutura e propriedades do solo.

Conforme Novais et al. (2007), quanto maior o pH do solo, menor será a disponibilidade de matéria orgânica, devido a formação de complexos de baixa solubilidade para as culturas. Já Gupta et al. (2013) relataram que, quanto menor o pH do solo, maior a concentração de metais pesados, principalmente devido à absorção de fases solúveis e trocáveis por meio do aumento da atividade de íons hidrogênio.

Ao analisar o comportamento das formas de nitrogênio em solo cultivado com milho irrigado com água residuária da suinocultura (ARS), Sampaio et al. (2010a) constataram que o nitrogênio inorgânico aumentou sua concentração em função da taxa de ARS e do tempo, diminuindo em alguns estágios em que a planta apresentava maior necessidade desse elemento.

A concentração elevada de sais solúveis pode afetar seriamente o desenvolvimento e a produção de muitas culturas. À medida que a concentração de sais aumenta na solução do solo, o potencial osmótico reduz, requerendo assim uma energia maior da planta para absorver a água do solo. Os efeitos imediatos da salinidade sobre os vegetais são a seca fisiológica, proveniente do decréscimo do componente osmótico do potencial da água no solo; o desequilíbrio nutricional, devido ao aumento da concentração de determinados íons, inibindo a absorção de outros nutrientes; além do efeito tóxico de certos íons em concentração elevada, como, particularmente, o cloro, sódio e boro (Ferreira, 2007).

Quando o teor de sódio é alto em relação aos demais cátions, este pode ser adsorvido pelo complexo de troca e, nesse caso, as partículas de argila podem dispersar-se e o solo perde sua estrutura, tornando-se impermeável (Holanda Filho et al., 2011).

Urbano et al. (2015) observaram que as propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico não sofreram nenhum dano após irrigação com água residuária doméstica tratada, correspondente à demanda de cinco ciclos de cultivo de alface, mas resultou em tendência à salinização.

Os aumentos nos elementos tóxicos também afetam negativamente o tamanho, a diversidade e a atividade da comunidade microbiana no solo (Yuan et al., 2007; Mavi et al., 2012; Yan & Marschner, 2013), com consequente diminuição na taxa de decomposição da matéria orgânica do solo (Bowles et al., 2014; Mavi et al., 2012).

Os efeitos adversos são variáveis e dependem de vários fatores, como o tipo de irrigação, a quantidade de água empregada, a capacidade de drenagem do solo, a precipitação local e a qualidade, origem e tratamento das águas residuárias (Heidarpour et al., 2007; Xu et al., 2010; Morugán-Coronado et al., 2011; Pereira et al., 2011; Sou/Dakouré et al., 2013). Esses fatores devem ser considerados em estudos que visam avaliar o efeito das águas residuárias no sistema solo-planta, a fim de coletar as informações necessárias para o manejo adequado desses recursos hídricos.

Dessa forma, se manejada corretamente, a reutilização de águas residuárias na agricultura é considerada uma solução técnica para minimizar a degradação do solo e restaurar os teores de nutrientes (Plauborg et al., 2010; Khurana & Singh, 2012).

3.6 Qualidade da água para irrigação

Os recursos hídricos servem para múltiplos usos concorrentes. Os setores mais importantes envolvidos são, geralmente, aqueles que atendem às necessidades urbanas das famílias, a indústria, a agricultura e o setor de energia. Entre estes, a agricultura é o maior usuário das águas retiradas de rios e reservatórios naturais e artificiais (Pereira, 2011).

Diante deste cenário, a prática do reuso de água permite que recursos hídricos de melhor composição sejam utilizados para fins mais nobres, trazendo benefícios ambientais, sociais e econômicos, bem como propiciar redução dos custos de produção agrícola (Sandri & Rosa, 2017), pois como a água recuperada contém muitos nutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, pode diminuir o uso de fertilizantes na irrigação agrícola (Jeong et al., 2014).

A Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017), em seu Artigo 37, abrange as seguintes modalidades para reuso direto de água não potável:

I – Reuso para fins agrícolas e florestais: aplicação de águas de reuso para a produção agrícola e cultivo de florestas plantadas;

II – Reuso para fins ambientais: utilização de água de reuso para implantação de projetos de recuperação do meio ambiente; e,

III – Reuso para fins industriais: utilização de processos, atividades e operações industriais.

Os parâmetros específicos para o reuso externo de efluentes não sanitários para fins agrícolas e florestais e para fins ambientais estão representados na Tabela 4.

Tabela 4. Valores orientadores para reuso de efluentes não sanitários para fins agrícolas e florestais e para fins ambientais, de acordo com a Resolução COEMA n° 2/2017 do Estado do Ceará

Atividade	Parâmetros	Valores
Reuso para fins agrícolas e florestais	Coliformes termotolerantes	≤ 1000 CT 100 mL^{-1}
	Ovos de geohelmintos	≤ 1 ovo L^{-1} de amostra
	Condutividade elétrica	≤ 3000 µS cm^{-1}
	pH	entre 6,0 e 8,5
	Razão de adsorção de sódio (RAS)	(15 mmolc L^{-1}) $^{1/2}$
Reuso para fins ambientais	Coliformes termotolerantes	≤ 10.000 CT 100 mL^{-1}
	Ovos de geohelmintos	≤ 1 ovo L^{-1} de amostra
	Condutividade elétrica	≤ 3000 µS cm^{-1}
	pH	entre 6,0 e 8,5

Fonte: Adaptado de Ceará (2017).

Dessa forma, o reuso externo de efluentes não sanitários deverá obedecer, conforme a modalidade de reuso, os parâmetros citados acima (Tabela 4) e os valores máximos

admissíveis das substâncias, de acordo com a tipologia do empreendimento. Para a refinaria e indústria de beneficiamento de petróleo, deve-se levar em consideração os valores máximos admissíveis dos seguintes parâmetros: ferro solúvel, cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, níquel, zinco, benzeno, estireno, tolueno e xileno (Ceará, 2017).

Quanto ao reuso para fins agrícolas, apresenta-se na Tabela 5 a qualidade da água de irrigação relacionada à fitotoxicidade das plantas. Torna-se necessário considerar os efeitos nocivos das águas de qualidade inferior no sistema solo-planta, pois podem interferir nos atributos edáficos e no desempenho produtivo das culturas (Silva et al., 2011), sendo assim, os níveis de metais pesados tolerados por elas devem ser observados.

Tabela 5. Qualidade de água de irrigação relacionada à fitotoxicidade das plantas

Elementos	Concentração[1] (mg L^{-1})	Observações
Al	5,0	Pode causar perda da produtividade em solos ácidos (pH < 5,5), mas em solos alcalinos (pH > 7,0) poderá ocorrer precipitação, eliminando o risco de toxicidade.
As	0,10	A faixa de toxidez é amplamente variável nas plantas. Grama do Sudão apresenta tolerância de 12 mg L^{-1}, enquanto a cultura do arroz é de 0,05 mg L^{-1}.
Be	0,10	A faixa de toxidez é amplamente variável nas plantas. Couve apresenta tolerância de 5 mg L^{-1}, enquanto em feijão é de 0,5 mg L^{-1}.
Cd	0,01	Tóxicos a feijão, beterraba e nabos com concentração abaixo 0,1 mg L^{-1} em soluções nutritivas. Esses limites conservadores são indicados devido ao seu potencial de acumulação, tanto na planta como no solo.
Co	0,05	Tóxico à cultura do tomate, com concentração de 0,1 mg L^{-1} em soluções nutritivas. Tende ser inativo em solos neutro a alcalinos.
Cr	0,10	Não é reconhecido como elemento essencial ao crescimento das plantas. Limites conservadores são recomendados devido à falta de conhecimento de sua toxicidade às plantas.
Cu	0,20	Tóxico a várias plantas com concentrações que variam de 0,1 a 1,0 mg L^{-1} em soluções nutritivas.
F	1,0	Inativo em solos alcalinos e neutros.
Fe	5,0	Não tóxico às plantas em solos bem aerados, mas pode contribuir para acidificação do solo e diminuição da disponibilidade de fósforo e molibdênio. Quando aplicado por irrigação por aspersão, pode acumular-se nas plantas e nos equipamentos.
Li	2,5	Tolerada pela maioria das culturas até 5 mg L^{-1}. Tóxico para citros em baixas concentrações (< 0,075 mg L^{-1}). Age similarmente ao boro.
Mn	0,20	Tóxico à várias culturas em concentrações muito baixas. Ocorre normalmente em solos ácidos.
Mo	0,01	Não é tóxico à cultura em concentrações normalmente encontradas no solo e na água, mas em solos com altas concentrações de molibdênio disponível pode causar toxicidade.
Ni	0,20	Tóxico à várias plantas em concentrações variando de 0,5 a 1,0 mg L^{-1}. Sua toxidez é reduzida em solos com pH neutro ou alcalino.
Pd	5,0	Pode inibir o crescimento de certas plantas em concentrações muito altas.
Se	0,02	Tóxico às plantas em concentrações abaixo de 0,025 mg L^{-1}.
Ti	-	Efetivamente excluído pelas plantas, desconhecido a tolerância.
V	0,10	Tóxico à muitas plantas a baixas concentrações.
Zn	2,0	Tóxico à muitas plantas em variadas concentrações. Sua toxicidade é reduzida com pH > 6 e em solos de boa textura e orgânicos.

Nota: [1] Os valores de concentração máxima estão baseados em uma taxa de aplicação de água considerando-se uma aplicação de 10.000 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Se a taxa de aplicação de água exceder muito, as concentrações máximas deverão ser ajustadas para baixo. Nenhum ajuste deverá ser realizado quando as taxas de aplicação forem inferiores a 10.000 m^3 ha^{-1} ano^{-1}. Os valores dados são para água usada em uma base contínua.

Fonte: Léon Suematsu & Cavallini (1999).

3.7 Irrigação de cultivos agrícolas com água produzida de petróleo

A possibilidade de que a água produzida possa ser reutilizada na agricultura por meio da irrigação é de interesse para a indústria do petróleo e os agricultores, particularmente aqueles em regiões semiáridas, como o Nordeste do Brasil (Sousa et al., 2016).

A Petrobras, vendo os benefícios vinculados ao reuso, elaborou um projeto piloto, com o objetivo de estudar o reuso da água produzida para a irrigação, no campo da Fazenda Belém no Ceará, avaliando os efeitos desta água no solo, nas águas subterrâneas e no crescimento e produção de oleaginosas e flores ornamentais. O projeto visa que a água produzida passe por tratamentos nas plantas pilotos, além de processos avançados de dessalinização e filtração, para que possa possibilitar seu reuso (Pinheiro et al., 2014b). Após esses tratamentos, a água produzida não apresentou risco quanto aos seus metais tóxicos (Sousa et al., 2016) e hidrocarbonetos aromáticos e poliaromáticos (Crisóstomo et al., 2016).

Sousa et al. (2016) avaliaram os aspectos nutricionais da cultura de girassol irrigado com água produzida e os efeitos na produção de biomassa e de grãos. Estes autores constataram que as plantas irrigadas com água produzida filtrada apresentaram maiores teores de sódio nas raízes e na parte aérea, afetando negativamente a produção de biomassa e de grãos de girassol. Em contrapartida, a água produzida tratada por osmose reversa não afetou o crescimento dos girassóis.

Marques et al. (2015) realizaram um estudo com o objetivo de avaliar os possíveis efeitos tóxicos da água produzida na germinação de sementes e desenvolvimento de mudas de girassol (*Helianthus annuus* L.) e, constataram que um tratamento adequado da água produzida foi necessário para não afetar o desenvolvimento das plântulas, sendo a eletrofloculação uma alternativa interessante para a remoção de óleo e matéria orgânica solúvel em excesso na água produzida pelo campo petrolífero.

No trabalho de Andrade et al. (2011) recomenda-se a utilização da água produzida tradada em cultivos agrícolas não comestíveis, tais como as oleaginosas para produção de biodiesel (girassol, soja e mamona) e plantas ornamentais (girassol e abacaxi).

Conforme Pica et al. (2017), a alta salinidade, o teor de carbono orgânico total (COT) e a presença de compostos orgânicos tóxicos (benzeno, por exemplo) são os principais constituintes poluentes da água produzida que precisam ser avaliados quando se considera a reutilização para fins agrícolas. Estes autores avaliaram a resposta de gramíneas e de colza à irrigação com água produzida e constataram que o teor orgânico da mesma causou um impacto negativo no rendimento da biomassa e nos parâmetros fisiológicos de ambas as espécies.

Meneses et al. (2017) constataram que a atividade microbiológica e o carbono orgânico do solo são sensíveis à irrigação de plantas de girassol com água produzida em campos petrolíferos. Na cultura da mamona, essa irrigação afetou a respiração basal do solo.

Lopes et al. (2014) avaliaram os atributos biológicos e bioquímicos dos solos irrigados com água produzida durante um ciclo de produção do girassol e da mamona. Estes autores observaram mudanças na proliferação de microrganismos e na atividade da nitrogenase após irrigação com água residuária proveniente do petróleo.

O uso da água produzida, em grande escala, propiciaria o aumento na produção de petróleo e minimizaria o descarte de água produzida no meio ambiente (Pinheiro et al., 2014b).

3.8 Processo de fitoextração

Os ecossistemas terrestres, como solos, com elevada concentração de metais pesados, exigem ação remediadora que diminua os teores desses poluentes em níveis ambientalmente seguros (Tavares et al., 2013). Essa ação, pelas atividades humanas, pode ser feita através de vários métodos, tais como escavação, incineração e outros que são bastante dispendiosos. Por isso, em anos recentes, passou-se a dar preferência por métodos "in situ" que perturbem menos o ambiente e sejam mais econômicos (Chaves & Souza, 2015).

Dentro deste contexto, a biotecnologia oferece a fitorremediação, que lida com a aplicação de plantas para a remediação de ambientes poluídos (Ekperusi et al., 2019). Essa técnica ambiental é relativamente nova e apresenta boa relação custo-benefício, além de ser bem aceita como um método natural de controle da poluição (Vendruscolo et al., 2018).

A fitoextração é um subprocesso da fitorremediação em que as raízes das plantas absorvem contaminantes metálicos do solo e translocam-os para os tecidos coletores acima do solo (Padmavathiamma & Li, 2007).

Entretanto, para que essa técnica seja aplicada em determinada área, alguns padrões devem ser levados em consideração, como o tipo de poluente presente naquele ambiente, sua concentração e a capacidade fitorremediadora da espécie de planta a ser utilizada (Coutinho & Barbosa, 2007).

Plantas ideais para fitoextração devem possuir múltiplos traços como capacidade de crescer fora de sua área de coleta, crescimento rápido, alta biomassa, fácil colheita e acúmulo de uma variedade de metais pesados em suas partes colhíveis (Jabeen et al., 2009; Kacalkova et al., 2015). De acordo com Bhargava et al. (2012), nenhuma planta atualmente conhecida preenche todos esses critérios.

As plantas que apresentam a capacidade de acumular altas quantidades de metais pesados na matéria seca da parte aérea são conhecidas como hiperacumuladoras. Para isso, Krämer, 2010 e Ent et al. (2013) descrevem que para uma planta ser considerada como tal, deve absorver e reter na parte aérea, no mínimo, as seguintes concentrações: 100 mg kg^{-1} para Cd, 1000 mg kg^{-1} para Co, Cu, Cr, Ni e Pb e 10000 mg kg^{-1} para Zn e Mn.

No Brasil e no mundo, alguns experimentos vêm sendo conduzidos com o objetivo de avaliar o potencial fitoextrator de espécies forrageiras em solos contaminados; entretanto, inexistem estudos sobre a capacidade da palma forrageira voltada para este fim.

Lima et al. (2010a) avaliaram o potencial de fitoextração do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) e da aveia preta em Argissolo contaminado por cádmio. Os resultados mostraram que o nabo forrageiro foi a espécie que acumulou maior quantidade de Cd na parte aérea e apresentou o maior índice de translocação do metal.

Li et al. (2016) compararam a eficiência de seis espécies forrageiras de alta biomassa na fitoextração de metais pesados (Cd, Pb e Zn) de solo contaminado sob duas estratégias de colheita (colheita dupla e colheita única). Entre as plantas testadas, o amaranto acumulou as maiores quantidades de Cd e Zn, enquanto o Rumex K-1 apresentou a maior quantidade de Pb na parte aérea.

Em estudo realizado por Souza et al. (2011), constatou-se que as altas concentrações de Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+} e, especialmente Na^{+} e Cl^{-} nas folhas de *Atriplex nummularia* lindl., associadas à elevada produção de massa seca, caracterizam esta espécie como planta fitoextratora de sais.

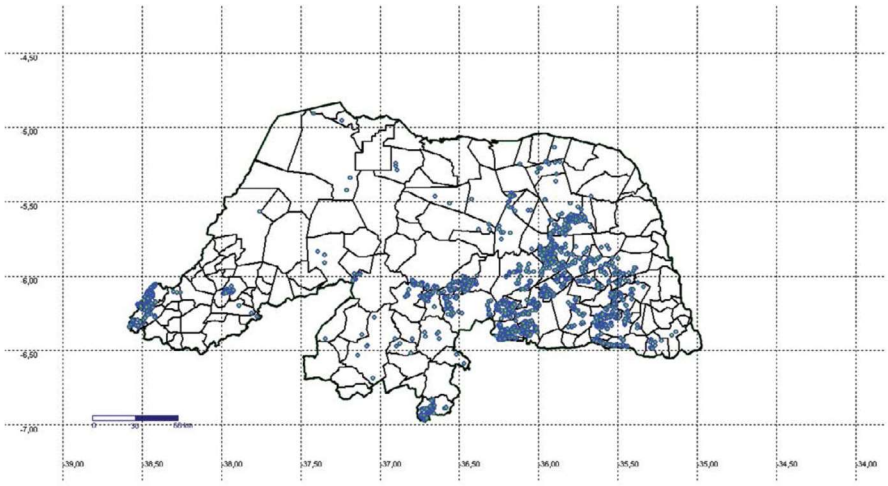
3.9 Introdução da palma forrageira no Rio Grande do Norte

Após a seca de 2012, que na maioria dos municípios do Rio Grande do Norte continuou em 2013, 2014 e 2015, ficou claro mais uma vez, pelo grande número de mortes de bovinos e redução significativa dos rebanhos do semiárido, que é praticamente impossível conduzir sistemas pecuários nessa região sem a formação de reservas forrageiras estratégicas (Lima et al., 2015). Das diversas famílias de plantas que existem nestas áreas, as cactáceas são uma das mais importantes, em virtude dos seus mecanismos de adaptação à escassez de água, o que permite a sua perenidade em ambientes de extrema condição de aridez (INSA, 2016).

Neste cenário, a palma forrageira (*Opuntia* spp. e *Nopalea cochenillifera*) aparece como alternativa de cultivo, adaptada às condições edafoclimáticas do semiárido, visto ser uma cultura com mecanismo fisiológico especial, no que se refere à absorção, aproveitamento e perda de água (Silva et al., 2014). Além disso, apresenta alta produtividade, excelente

qualidade como alimento energético de alta digestibilidade e, ainda, constitui-se em uma estratégica reserva hídrica para os rebanhos, sendo uma importante ferramenta no manejo e proteção do solo (Lima et al., 2015).

O Instituto de Defesa e Inspeção Agrepecuária do Rio Grande do Norte (IDIARN) realizou um cadastro, em 2013, das propriedades que cultivam palma forrageira no estado, com vista à detecção da praga cochonilha do carmim (IDIARN, 2013). Foram registradas e georreferenciadas 4.213 propriedades englobando uma área cultivada próxima a três mil hectares. Como se pode ver no mapa geral do estado (Figura 2), com o georreferencimento das propriedades, fica claro a baixa presença da palma nos sertões de baixa altitude e a maior presença nas áreas de serras e de maior pluviosidade. Algumas regiões e grupos de municípios se destacam pela presença da cactácea, entre eles: no Alto Oeste (Doutor Severiano, São Miguel, Venha Ver e Coronel João Pessoa); no Trairi (Campo Redondo, Coronel Ezequiel, Jaçanã, Santa Cruz e São Bento do Trairi); no Seridó (Equador, Currais Novos, Florânia, Cerro Corá, Lagoa Nova e Tenente Laurentino) e no Agreste (São Tomé, Rui Barbosa, São Paulo do Potengi, Barcelona e Lagoa de Velhos).



Fonte: IDIARN (2013).

Figura 2. Mapa geral do RN com o georreferenciamento das propriedades com palma forrageira

Infelizmente a palma nunca teve um bom desempenho em grande parte do semiárido potiguar, pois sempre sofreu severas murchas em função de condições climáticas inadequadas para a cultura como altas temperaturas, principalmente noturnas e baixa umidade relativa do ar. Este cenário é observado em várias regiões do Rio Grande do Norte, em particular nas áreas de baixa altitude, e tem representado um impedimento para a expansão desse importante suporte forrageiro, pois as murchas ocorrem exatamente no período de outubro a janeiro, quando a demanda por forragem é acentuada no semiárido (Lima et al., 2015).

Este quadro de murchas e baixas produções tem sido revertido quando se implanta a irrigação, mesmo utilizando quantidades mínimas de água, como por exemplo, num sistema por gotejamento, tornando-se uma opção tecnológica para essas localidades (Lima et al., 2015).

No Nordeste do Brasil, tradicionalmente são utilizadas na alimentação de ruminantes as espécies *Opuntia ficus-indica* Mill., cultivares Gigante e Redonda e *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick., cultivar palma Miúda ou palma Doce (Santos et al., 2010). As maiores áreas de cultivo são encontradas nos Estados de Alagoas, Bahia, Pernambuco, Paraíba e Sergipe (INSA, 2016).

A palma Gigante apresenta porte bem desenvolvido, bom crescimento vertical, mas pouca ramificação. Suas raquetes chegam a pesar 1 kg, aproximadamente, com formato elíptico, aspecto carnoso e coloração verde-acinzentada. Essa palma é considerada a mais produtiva e mais resistente às regiões secas, no entanto é menos palatável para os animais e de menor valor nutricional (Silva & Sampaio, 2015).

A palma redonda apresenta porte médio e caule muito ramificado lateralmente, reduzindo assim o crescimento vertical. Suas raquetes chegam a pesar 1,800 kg, apresentando forma arredondada e ovoide. Apresenta grandes rendimentos de um material mais tenro e palatável que a palma gigante (Silva & Sampaio, 2015).

Já a palma Miúda tem porte baixo e compacto, face à superbrotação; suas raquetes são alongadas, verdes quando jovens e de um verde intenso quando adultas, chegando a pesar apenas 350 g. Comparada com as duas anteriores, essa é a mais nutritiva, apresentando maiores teores de matéria seca e carboidrato; porém, é mais exigente em fertilidade e umidade e tem menor resistência à seca (Vasconcelos et al., 2009; Silva & Sampaio, 2015).

Entre as cultivares, apenas a miúda era resistente à *Dactylopius Opuntia* (cochonilha-do-Carmim) (Vasconcelos et al., 2009; Neves et al., 2010). Por esse motivo, nos últimos anos, a disseminação da praga acabou sendo um dos principais fatores limitantes ao cultivo dessa forrageira, o que promoveu uma redução substancial de palmais em toda região.

Recentemente, estudos foram conduzidos visando selecionar clones resistentes. Assim, outros dois têm se destacado, a Orelha de Elefante Mexicana [*Opuntia stricta* (HAW.) HAW.] e a IPA Sertânia [*Napolea cochenillifera*, Salm-Dick.], ambas resistentes à cochonilha-do-Carmim (Silva et al., 2015; Queiroz et al., 2015).

3.10 Características morfofisiológicas da palma forrageira

A palma apresenta-se como alternativa muito utilizada em regiões semiáridas (Leite et al., 2014) em função de suas características morfofisiológicas que tornam essa forrageira adaptada, podendo ser introduzida na alimentação de ruminantes em quantidades elevadas desde que associada a fontes de fibra fisicamente efetiva, a fim de atender grande parte das exigências de energia, tornando-se uma importante estratégia na sustentabilidade dos sistemas de produção nessas regiões.

A resistência à seca envolve aspectos de sua morfologia, fisiologia e bioquímica, sendo considerados três mecanismos relacionados à seca: resistência, tolerância e escape. A resistência está relacionada à sua própria condição xerofítica; a tolerância está relacionada a fatores bioquímicos, como a diminuição do metabolismo. O escape, através de um sistema radicular superficial e ramificado que lhe possibilita um eficiente aproveitamento das precipitações pluviométricas pouco intensas (Oliveira et al., 2011).

A interação entre plantas e ambiente condiciona a produção vegetal, que está diretamente relacionada ao aproveitamento da energia solar, transformada pelas folhas em energia química durante o processo fotossintético (Pinheiro et al., 2014a).

Na palma forrageira, o uso da radiação é processado pelo cladódio, que promove a produção de carboidratos e de biomassa seca. A cultura apresenta baixo índice de área do cladódio, quando comparada às espécies leguminosas, o que resulta em uma menor taxa de acúmulo de biomassa (Oliveira et al., 2007). Essa característica, no entanto, também depende do clone, que apresenta diferentes morfologias de emissão, tamanho, formato e distribuição dos cladódios. Essa diferenciação pode influenciar a capacidade fotossintetizante e o rendimento da palma forrageira (Silva et al., 2010).

Zanudo-Hernández et al. (2010) estudaram a espécie *Opuntia ficus-indica* e observaram que esta mantém sua atividade fotossintética mesmo após cinco meses que cessarem as precipitações pluviométricas e que em solos com umidade limitada ainda ocorre incremento significativo de biomassa nos cladódios.

O índice de área do cladódio (IAC) é fundamental na determinação da área fotossintética ativa da planta pois indica a capacidade da planta em interceptar a luz solar, para, eficientemente, transformá-la em produção de matéria seca (Donato et al., 2014).

A relação entre as características morfológicas – como altura e largura da planta, índice de área do cladódio e comprimento do cladódio – e o rendimento da planta representa um dado de grande importância para a compreensão da resposta da palma forrageira às condições do ambiente de cultivo. Estudos mostram que essa informação permite o acompanhamento do

acúmulo de forragem e uma estimativa de sua qualidade, os quais podem ser melhorados com a adequação de práticas de manejo ao longo do ciclo da cultura (Costa et al., 2012).

Neder et al. (2013) relataram que a produção de matéria verde, o número e a espessura dos cladódios podem ser utilizados na seleção de acessos da espécie *Opuntia ficus-indica*. Silva et al. (2010) também constataram a influência de características morfológicas na produtividade de clones de palma forrageira.

Pinheiro et al. (2014a), em estudo realizado com três clones de palma forrageira (IPA Sertânia, Miúda e Orelha de Elefante Mexicana) em condições de sequeiro no semiárido, observaram que as características morfológicas que mais influenciaram o rendimento da palma forrageira foram o número de cladódios total e o índice da área do cladódio.

A palma pode suportar longos períodos de estiagem, sendo esta adaptação atribuída a sua fisiologia, caracterizada pelo processo fotossintético denominado Metabolismo Ácido das Crassuláceas (CAM, do inglês Crassulasean Acid Metabolism). As plantas que assimilam o CO_2 através do sistema CAM, desenvolveram o mecanismo de fechar os estômatos durante o dia, o que evita a perda excessiva de água pelo processo de transpiração e assim mantêm a hidratação dos tecidos (Marques et al., 2017).

Este mecanismo fotossintético diferenciado foi decisivo para a adaptação desta cactácea às condições semiáridas, caracterizada pela alta eficiência no uso da água, na faixa de 100 a 150 kg kg^{-1} de matéria seca (MS), o que a torna seis vezes mais eficiente que as leguminosas e quase três vezes mais eficientes que as gramíneas (Santos et al., 2006).

Além do metabolismo CAM, a palma apresenta algumas estruturas morfoanatômicas que representam adaptações a ambientes com déficit hídrico, tais como presença de tricomas e estômatos profundos, no interior de criptas formadas por camadas de cutinas sobre a epiderme (Santos et al., 2010).

A arquitetura de uma planta de palma varia conforme o cultivar, idade da planta, espaçamento de plantio, orientação dos artículos e números de artículos por ordem. Por sua vez, o número de cladódios ou artículos da palma varia com a idade, o ambiente e o cultivar (Santos et al., 2010).

3.11 Irrigação no cultivo e manejo da palma forrageira

Pesquisas sobre o uso de eventos de irrigação em várias culturas agrícolas têm proporcionado aumento da eficiência do sistema de produção, em detrimento aos impactos sobre o ambiente (Martin et al., 2012).

Na palma forrageira, apenas recentemente tem se estimulado o uso de irrigação como opção de incremento produtivo no Semiárido brasileiro. Essa tendência é evidenciada para outras plantas forrageiras (Vale & Azevedo, 2013), e embora não seja comum para essa espécie, há registros bem-sucedidos nos Estados do Rio Grande do Norte e de Pernambuco (Queiroz et al., 2015; Lima et al., 2016).

As plantas CAM continuam realizando fotossíntese mesmo com acesso mínimo àágua (Taiz & Zeiger, 2013). A assimilação de carbono por essas plantas ocorre de forma mais lenta que nas C3, porém, a maior eficiência no uso da água das primeiras permite a continuidade da fotossíntese em épocas de escassez hídrica, tornando as plantas mais capazes de completar seu ciclo de desenvolvimento (Hopkins & Hüner, 2009).

Assim, ao se dispor de um sistema de irrigação, mesmo que a quantidade de água seja um tanto limitada, ainda que o suprimento hídrico através da irrigação não atinja os requerimentos da cultura, uma pequena quantidade de água pode promover respostas produtivas positivas na planta. Este tipo de manejo, conhecido como irrigação deficitária, ou déficit de irrigação ("*déficit irrigation*"), pode ser utilizado em áreas com disponibilidade limitada de água para fins agrícolas, além de ser uma opção para o cultivo de palma nestas regiões, com a utilização mínima de água em sistema de gotejamento, por exemplo (Lira et al., 2015). Conforme Neal et al. (2011), com a utilização do déficit de irrigação, há redução do escoamento superficial e da drenagem em relação à irrigação completa.

A produção da palma forrageira sem a utilização de suplementação hídrica (irrigação) é uma pratica realizada em áreas de altitude do semiárido Nordestino e na região Litoral Agreste, Trairi e as Serras, ato que dar-se mediante à ocorrência, nessas áreas, de temperaturas mais amenas no período noturno, favorecendo assim o desenvolvimento da cultura (Lima et al., 2010b).

Nas demais áreas do Sertão Central e Seridó, onde ocorre extremo déficit hídrico e predominam altas temperaturas que dificultam o desenvolvimento da cultura da palma, pode ser utilizado o sistema de irrigação por gotejamento com a aplicação de pequena quantidade de água em grande intervalo entre irrigações, alcançando altos níveis de produtividade (Rego et al., 2014; Marques et al., 2017).

No estado do Rio Grande do Norte, nos municípios de Apodi, Angicos, Cruzeta e Pedro Avelino, Lima et al. (2010b) relataram plantios de palma adensada (50 mil plantas ha^{-1}), espaçamento de 2,0 x 0,10 m, com irrigação por gotejamento em baixa intensidade (5 L m^{-1} a cada 15 dias) associada à adubação orgânica e mineral. Após um corte de uniformização aos 18 meses de idade, foram efetuados dois cortes com intervalos de 12 meses com rendimentos médios de 250 toneladas de matéria verde (MV) ao ano (27 t MS ha^{-1} ano^{-1}) para a palma

Gigante e 240 toneladas de matéria verde (MV) ao ano (25 t MS ha^{-1} ano^{-1}) para a palma Miúda ou Doce.

No estado de Pernambuco, Bezerra et al. (2015) estudaram a demanda de água de irrigação da palma forrageira em diferentes cenários climáticos, a partir de dados de postos meteorológicos e verificaram que a evapotranspiração anual da cultura simulada para o cenário atual (dados históricos de 1961 a 1990) foi de 874,24 mm ano^{-1}, e que a necessidade hídrica bruta para atender a demanda de água da palma, assumindo a precipitação pluviométrica efetiva no cenário atual, foi de 230,15 mm, ou seja, em média, esse é o valor que deve ser reposto via irrigação. No cenário atual, a necessidade hídrica bruta da palma para o estado de Pernambuco concentrou-se na faixa de 250 e 300 mm.

Numa primeira avaliação, pode parecer inapropriada a proposta de irrigação de uma cultura reconhecida como xerófita e resistente à seca, numa região que dispõe de apenas 2 a 3% de sua área com condições de irrigação. No entanto, os altos rendimentos obtidos, da ordem de 250 - 350 t MV ha^{-1} ano^{-1} ou 25 - 35 t MS ha^{-1} ano^{-1}, com utilização mínima de água (75 - 100 mil litros $mês^{-1}$ ha^{-1}), quantidade utilizada muitas vezes em apenas um dia nas culturas irrigadas tradicionais, e a utilização de fontes alternativas de água (captação de chuva, poços de baixa vazão, água de reuso), apontam para um alto potencial produtivo e mostram a necessidade de continuidade das pesquisas para avaliar a sustentabilidade do sistema no tempo (Lima et al., 2015).

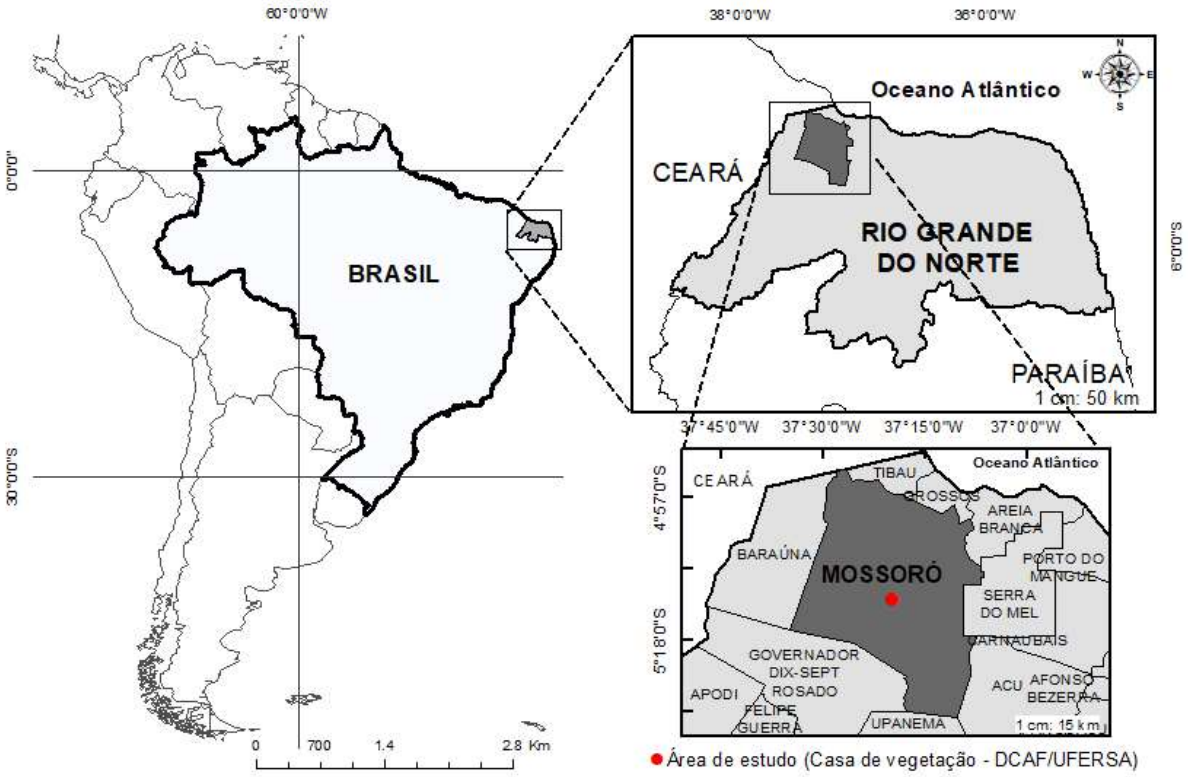
Assim, destaca-se que a irrigação viabiliza o plantio de palma forrageira em áreas com baixa adaptação à cultura; permite o plantio em diferentes épocas do ano, com produção de forragem mesmo nos períodos climáticos atípicos e, ainda, pode possibilitar cortes mais precoces e frequentes (Lira et al., 2015).

A presente pesquisa visa conciliar a utilização da água produzida obtida no processo de extração de petróleo e posteriormente tratada, visto ser um efluente gerado em grande quantidade no Nordeste brasileiro, ao cultivo da palma forrageira, em virtude de a cultura apresentar boa adaptação às condições climáticas da região.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização da área experimental e clima da região

O experimento foi desenvolvido, no período de janeiro a setembro de 2018, em casa de vegetação do Departamento de Ciências Agrárias e Florestais (DCAF), situado no Campus Oeste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), no município de Mossoró-RN, que apresenta as coordenadas geográficas 5º 12’ 11,25” S e 37º 19’ 25,77” O, com altitude de 18 m (Figura 3).



Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 3. Localização da área experimental

Conforme a classificação de Köppen, o clima da região é do tipo BSh (“clima seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono”), com precipitação pluviométrica bastante irregular, média anual de 794 mm; temperatura média anual de 26,50 °C; umidade relativa do ar média de 68,90%; insolação média diária de 7,83 horas e anual de 2.771,27 horas de brilho solar e velocidade média do vento de 0,84 m s^{-1}, durante um período histórico de 30 anos (Álvares et al., 2013).

A estrutura da casa de vegetação é em revestimento metálico medindo 21,0 m de comprimento por 7,0 m de largura, apresentando área total de 147 m², pé direito com 4,0 m de

altura e coberta em formato de arco com filme de polietileno de baixa densidade com aditivo antiultravioleta. As paredes laterais e frontais são confeccionadas com telas antiafídeos e rodapé de 0,30 m em concreto armado.

4.2 Origem da água produzida de petróleo e da água subterrânea

A água produzida utilizada no experimento foi obtida de um campo de petróleo localizado na zona rural do município de Mossoró, mais precisamente na comunidade de Jucuri/RN. As coletas foram realizadas por meio da captação da água produzida diretamente do reservatório localizado no campo, sendo posteriormente transferida para uma caixa impermeabilizadora de fibra de vidro com capacidade para 1000 L. Em seguida, era transportada até o local do experimento na UFERSA, sendo depositada em dois reservatórios de polietileno com capacidade para 500 L cada. Foram realizadas três coletas de água, sendo esta quantidade suficiente para ser utilizada durante o período experimental.

Após o armazenamento, a água produzida foi tratada no local do experimento com o AGEFLOC DW-3753 que é um polímero orgânico, fortemente catiônico sendo um polieletrólito para floculação de matéria suspensa em campos de petróleo e água em geral. Em solução aquosa este produto apresenta alta concentração de carga catiônica, elevado poder coagulante, acelerando a velocidade na formação de flocos em relação aos poliméricos e, ainda, atua removendo matérias orgânicas e inorgânicas. Aplicou-se 40 ml do polímero para cada 1.000 L de água produzida. Esperou-se um período de dois dias para que houvesse a decantação do material suspenso e separação da água do óleo para sua utilização, seguindo as recomendações de Costa (2018).

A água produzida bruta, coletada no reservatório do campo de petróleo, apresenta teor de óleos e graxas (TOG) aproximadamente igual a 80 mg L^{-1}. Após seu tratamento, o valor de TOG foi reduzido para aproximadamente 10 mg L^{-1}. Esse valor está abaixo da concentração máxima permitida de óleos minerais (até 20 mg L^{-1}) para lançamento de efluentes diretamente no corpo hídrico receptor, conforme o Artigo 16 da Resolução CONAMA nº 430/2011 (Brasil, 2011). Sendo assim, a eficiência de remoção de óleos e graxas obtida foi de 87,5%.

A água subterrânea utilizada para a diluição da água produzida tratada foi proveniente de poço tubular gerenciado pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN).

4.3 Caracterização da palma forrageira utilizada nos ensaios experimentais

Para a condução do experimento, foi utilizado um clone de palma forrageira, a Palma Miúda/IPA-100004 (Figura 4), pertencente à espécie *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm-Dick, escolhida por ser resistente à praga cochonilha-do-Carmim (*Dactylopius Opuntia*).

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 4. Ilustração da palma forrageira cv. Miúda em campo, na estação experimental da Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN)

As raquetes de palma foram obtidas no dia 12 de janeiro de 2018, junto à Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN), na estação experimental localizada no município de Apodi-RN, na rodovia RN 233 (5° 37' 37,4" S e 37° 48' 56,3" O).

As raquetes foram colhidas em campo, cortando-as na junta com facas amoladas e limpas, selecionando-se aquelas isentas de patologia ou infecção de pragas, conforme recomendado por Lima et al. (2015). Após a etapa da colheita em campo, os cladódios foram levados até a UFERSA e deixados em repouso, à sombra, por um período de 13 dias para a cicatrização do corte e perda de parte da água, na Sala de Preparo de Amostras de Plantas do Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta do semiárido (LASAPSA), como apresentado na Figura 5.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 5. Cladódios de palma forrageira cv. Miúda deixados em repouso, à sombra, por um período de 13 dias na Sala de Preparo de Amostras de Plantas do LASAPSA

4.4 Caracterização do solo utilizado no experimento

O solo utilizado no experimento foi proveniente da Fazenda Experimental Rafael Fernandes, localizada na zona rural do município Mossoró, em Alagoinha, pertencente à Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), cujas coordenadas geográficas são 5º0,3'37" S e 37º23'50" O, com altitude média de 72 m. O solo da área em que se realizou a coleta é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico Típico, conforme classificação realizada por Rêgo et al. (2016).

Para a caracterização inicial do solo, foram coletadas amostras simples nas profundidades de 0 a 0,10 m e de 0,10 a 0,20 m em sete pontos distintos (zigue-zague) da área, com auxílio de trado holandês e espátula, formando duas amostras compostas.

As análises físicas (Tabela 6) e físico-químicas do solo (Tabela 7) foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) da UFERSA, seguindo a metodologia de Teixeira et al. (2017).

Tabela 6. Características físicas iniciais do solo utilizado no experimento

Profundidade (m)	Densidade do solo	Densidade de partículas	Areia	Silte	Argila	Classe textural	Relação Silte/Argila
	g cm^{-3}	g cm^{-3}	.....kg kg^{-1}.....				
0 - 0,10	1,78	2,78	0,90	0,03	0,07	Areia	0,44
0,10 - 0,20	1,72	2,70	0,84	0,03	0,13	Areia franca	0,24

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019)

Tabela 7. Características físico-químicas iniciais do solo utilizado no experimento

Profundidade	pH	$CE_{1:2,5}$	MO	N	P	K^+	Na^+	Fe	Mn	Cu	Zn
(m)		dS m^{-1}	g kg^{-1}	g kg^{-1}	..... mg dm^{-3}						
0 - 0,10	6,1	0,41	3,31	0,35	1,9	26,9	4,7	1,56	0,56	0,01	0,2
0,10 - 0,20	4,8	0,03	2,07	0,21	1,7	26,9	4,7	1,95	0,55	0,02	0,2
Profundidade	**Ca^{2+}**	**Mg^{2+}**	**Al^{3+}**	**H+Al**	**SB**	**CTC**	**t**	**V**		**m**	**PST**
(m)	..... $cmol_c$ dm^{-3}							..... %			
0 - 0,10	1,1	0,7	0	1,49	1,89	3,37	1,89	56		0	1
0,10 - 0,20	0,4	1	0,15	1,98	1,49	3,47	1,64	43		9	1

Nota: pH - potencial hidrogeniônico em água na relação 1:2,5; CE - condutividade elétrica do solo na relação 1:2,5; MO - matéria orgânica; N - nitrogênio; P - fósforo; K^+ - potássio; Na^+ - sódio; Fe - ferro; Mn - manganês; Cu - cobre; Zn - zinco; Ca^{2+} - cálcio; Mg^{2+} - magnésio; Al^{3+} - alumínio trocável; H+Al - acidez potencial; SB - soma de bases; CTC - capacidade de troca catiônica; t - capacidade de troca de cátions efetiva; V - saturação por bases; m - saturação por alumínio; PST - porcentagem de sódio trocável.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

A densidade do solo foi determinada pelo método do anel volumétrico e a densidade de partículas pelo método do balão volumétrico; análise granulométrica (areia, silte e argila) determinada conforme o método da pipeta; pH - potencial hidrogeniônico em água na relação 1:2,5 determinado com o auxílio de peagâmetro; CE - condutividade elétrica do solo na relação 1:2,5 determinada utilizando-se o condutivímetro; MO - matéria orgânica determinada pelo método Walkley-Black; N - nitrogênio, pelo método de Tedesco; P, K^+ e Na^+ - fósforo disponível, potássio e sódio trocável, extraídos com Mehlich-1; Fe, Mn, Cu e Zn - ferro, manganês, cobre e zinco extraídos por Mehlich-1 e determinados por espectrofotometria de absorção atômica; Ca^{2+}, Mg^{2+}, e Al^{3+} - cálcio, magnésio e alumínio trocáveis, extraídos com KCl 1 mol L^{-1}; acidez potencial (H+Al) extraída por acetato de cálcio 0,5 mol L^{-1}; SB - soma de bases (Ca^{2+} + Mg^{2+} + K^+ + Na^+); CTC - capacidade de troca catiônica (SB + H+Al); t - capacidade de troca de cátions efetiva (SB + Al^{3+}); V - saturação por bases (SB/CTC x 100); m - saturação por alumínio (Al^{3+}/t x 100); e PST - porcentagem de sódio trocável (Na^+/CTC x 100).

4.5 Instalação e condução do experimento

4.5.1 Parcelas experimentais e tratamentos

O experimento foi montado no delineamento em blocos casualizados (DBC) com cinco tratamentos e cinco repetições. Os tratamentos seguiram as recomendações de diluição da água residuária em água subterrânea propostas por Costa et al. (2018), com o intuito de

minimizar os riscos de salinização e sodificação do solo. Dessa forma, foram avaliados os seguintes tratamentos:

a) T1 - 100% de água subterrânea (testemunha);

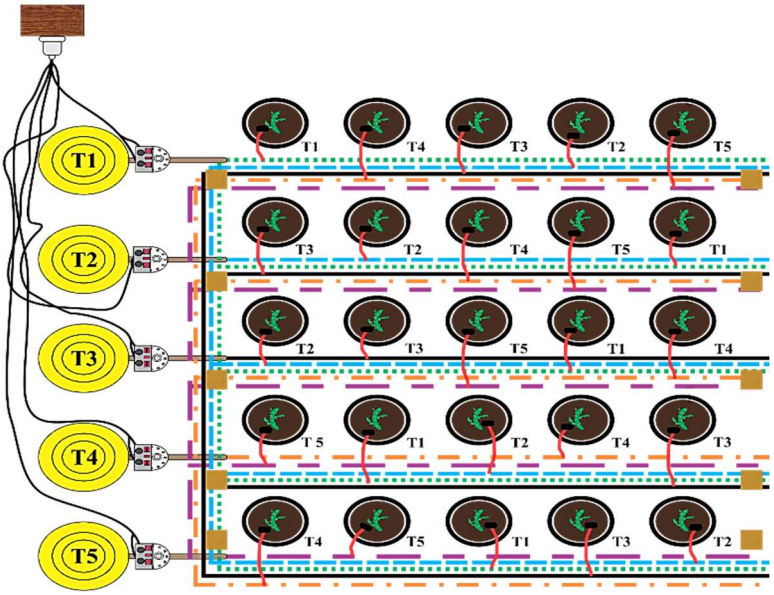
b) T2 - 75% de água subterrânea e 25% de água produzida tratada;

c) T3 - 50% de água subterrânea e 50% de água produzida tratada;

d) T4 - 25% de água subterrânea e 75% de água produzida tratada;

e) T5 - 100% de água produzida.

As diluições foram realizadas com baldes graduados, sendo armazenadas em reservatórios plásticos de 62 L, correspondentes ao seu respectivo tratamento. Um esquema do delineamento experimental é apresentado na Figura 6.



Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

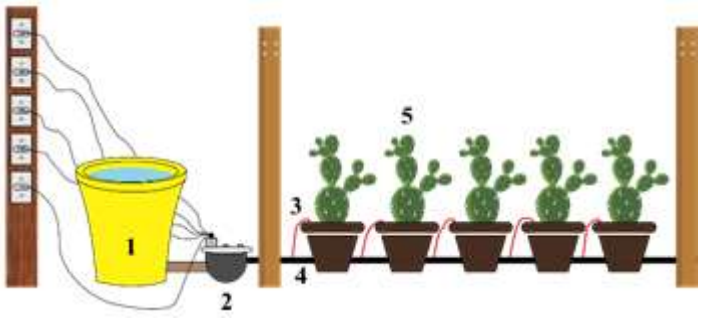
Figura 6. Esquema do delineamento experimental adotado para os ensaios de produção da palma forrageira com água produzida tratada em casa de vegetação

Cada parcela experimental, correspondente a cada vaso, foi posicionada no espaçamento de 1,20 m entre blocos e 0,50 m entre parcelas do mesmo bloco, onde foi cultivada a palma forrageira.

4.5.2 Caracterização do sistema de irrigação e de seu manejo ao longo do período experimental

Utilizou-se um sistema de irrigação localizada composto por cinco reservatórios de PVC de 62 L referentes a cada tratamento; cinco eletrobombas de circulação Metalcorte/Eberle, autoventilada, modelo EBD250076 e linhas laterais de polietileno de 16 mm que conduzia as

diluições de água produzida tratada até os vasos, onde foram inseridos emissores do tipo microtubos, com vazão média de 0,01 $m^3 h^{-1}$, conforme ilustrado na Figura 7.



Nota: 1 - Reservatório para armazenamento dos tratamentos; 2 - Eletrobomba; 3 - Microtubos; 4 -Linha lateral; 5 - Palma forrageira.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).
Figura 7. Vista transversal do esquema experimental adotado para os ensaios de produção da palma forrageira com diluições de água produzida tratada

Antes do plantio, no dia 22 de janeiro de 2018, o solo de cada vaso foi irrigado com água subterrânea, por cerca de cinco minutos, tempo necessário para que a água começasse a escorrer pelo fundo do vaso, indicando, assim, que a capacidade de campo foi atingida.

Paralelamente à primeira irrigação foi feita uma avaliação de uniformidade de distribuição da água. Para isso, determinou-se a vazão de todos os microtubos de cada linha lateral, coletando-se o volume aplicado de água pelo emissor durante um período de três minutos, onde este volume foi medido em uma proveta graduada de 100 mL, conforme recomendado pela NBR ISO 9261 (ABNT, 2006). O cálculo da vazão (Q) foi obtido empregando-se a Equação 1.

$$Q = \frac{V}{100 \cdot t}\ 60 \qquad (1)$$

Em que:

Q - Vazão do microtubo, L h^{-1};

V - Volume de efluente coletado, mL; e

t - Tempo de coleta do efluente, min.

Calculou-se, também, o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), o qual indica a uniformidade de aplicação da água ao longo do sistema, através da Equação 2.

$$CUD = 100 \cdot \frac{q_{25\%}}{\overline{q}} \quad (2)$$

Em que:

CUD - Coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

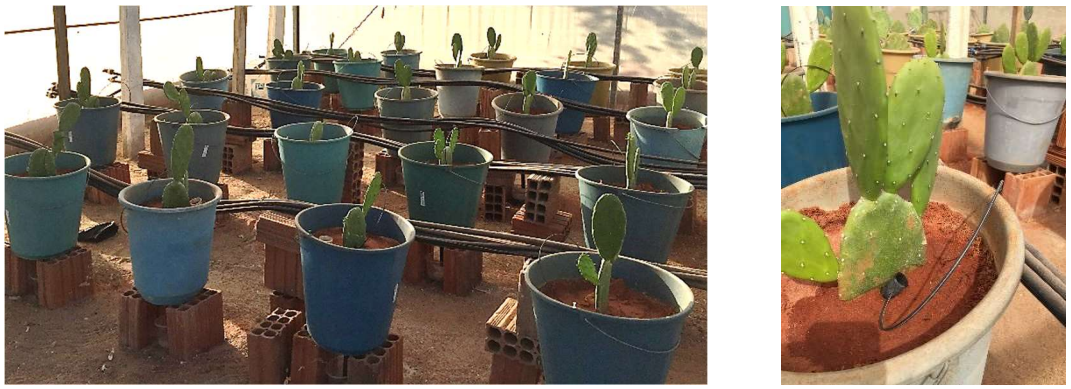
$q_{25\%}$ - Valor médio dos 25% menores valores de vazões dos gotejadores, L h^{-1}; e

$\overline{q}$ - Vazão média dos gotejadores, L h^{-1}.

4.5.3 Implantação do experimento

Para a implantação do experimento foram necessários 25 vasos, estes apresentavam volume útil de 20 L cada e foram dispostos enfileirados e sobre tijolos de 0,19 m de altura. Cada vaso foi preenchido com, aproximadamente, 1,0 kg de brita (nº 1), a qual cobriu a base do vaso, malha de polipropileno sobre as britas e, por fim, 12 kg de solo. O solo coletado na Fazenda Experimental da UFERSA "Rafael Fernandes" foi passado em uma peneira de 4 mm, com o objetivo de reduzir o tamanho dos torrões. Na base do vaso foi feito um furo para permitir a saída da água drenada, sendo esta coletada por meio de um recipiente plástico colocado entre os tijolos.

No dia 25 de janeiro de 2018, estando as raquetes já cicatrizadas, plantou-se uma por vaso (Figura 8). As raquetes foram enterradas até a metade (50%), com a parte cortada voltada para o solo, sendo feita a compactação manual ao seu redor para permitir melhor fixação e facilitar o pegamento. A face mais larga da raquete foi direcionada no sentido Leste-Oeste para que a mesma aproveitasse ao máximo a radiação solar, a fim de estimular a fotossíntese, a brotação e o enraizamento, conforme recomendado por Lima et al. (2015).



Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 8. Palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em casa de vegetação

Determinou-se a demanda hídrica da palma utilizando-se coeficientes de ajuste sobre a evapotranspiração de referência (ETo). A lâmina bruta de irrigação foi calculada por meio de um balanço hídrico, em que a entrada de água foi a irrigação e a saída, a evapotranspiração da cultura (ETc). Utilizou-se a Equação 3, proposta por Doorenbos & Pruitt (1977), modificada por Mantovani & Costa (1998), para se estimar a ETc:

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

Em que:

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

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

Kc - Coeficiente de cultura, adimensional.

A evapotranspiração de referência foi estimada com base na equação de Penman-Monteith (Allen et al., 2006), descrita na Equação 4.

$$ETo = \frac{0{,}408\,\Delta\,(Rn - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2\,(e_s - e_a)}{\Delta + \gamma\,(1 + 0{,}34\,U_2)} \quad (4)$$

Em que:

ETo - evapotranspiração de referência, em mm d^{-1};

Rn - saldo de radiação à superfície, em MJ m^{-2} d^{-1};

G - fluxo de calor no solo, em MJ m^{-2} d^{-1};

T - temperatura do ar a 2 m de altura, em °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;

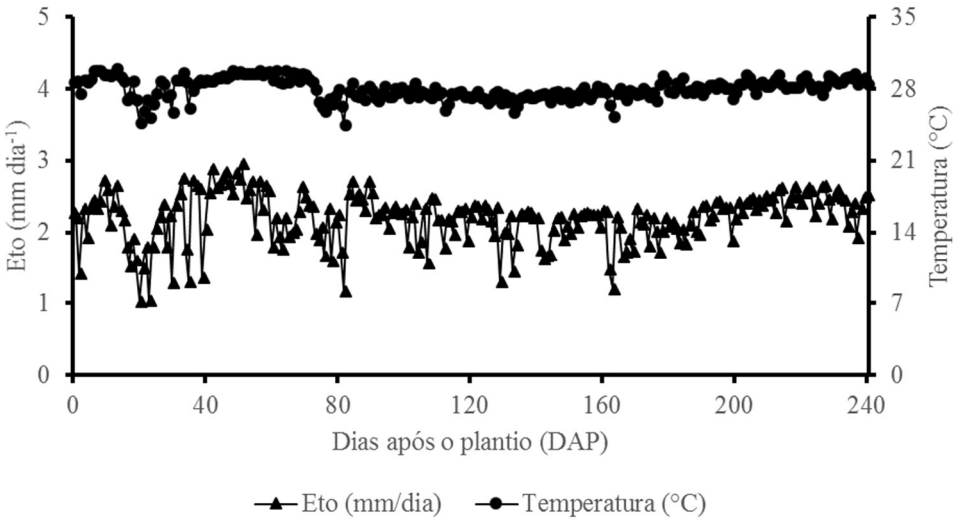
$(e_s - e_a)$ - déficit de pressão de vapor, em kPa;

Δ - declividade da curva de pressão de vapor de saturação, em kPa $^oC^{-1}$; e,

γ - constante psicrométrica, em kPa $^oC^{-1}$.

Os dados meteorológicos (temperatura, ºC; umidade relativa do ar, %; velocidade do vento, m s^{-1} e radiação solar global, MJ m^{-2} dia^{-1}) utilizados na estimativa da evapotranspiração de referência (ETo) foram coletados de uma estação agrometeorológica automática, instalada

dentro de uma casa de vegetação na UFERSA. Na Figura 9 estão apresentados os dados de ETo e temperatura média do ar ao longo dos 240 dias após o plantio.



Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 9. Valores diários da evapotranspiração de referência (ETo) e temperatura média do ar obtidas durante o período experimental

Adotou-se para a palma forrageira um coeficiente de cultivo (Kc) único, no valor de 0,7 para todas as fases, visto que não constam informações na literatura para a referida cultura em casa de vegetação. Em experimentos realizados em campo, são relatados valores de Kc para a cultura da palma iguais a 0,4 (Consoli et al., 2013), 0,52 (Queiroz et al., 2016) e 0,7 (Arba et al., 2016).

A primeira irrigação aplicando as diluições de água produzida tratada ocorreu no dia 05 de fevereiro de 2018, de acordo com os tratamentos indicados. As irrigações foram realizadas a cada sete dias.

Durante o ciclo da palma em casa de vegetação (240 dias após o plantio – DAP) foi aplicada uma lâmina bruta de irrigação igual a 1099,6 mm por tratamento, dividida nas cinco diluições de água produzida do petróleo tratada, conforme apresentado na Tabela 8.

Tabela 8. Lâminas de água produzida tratada (AP) e da água subterrânea (AS) utilizadas na irrigação da palma, ao longo do período experimental

Tratamentos	Lâminas de AP (mm)	Lâminas de AS (mm)	Lâminas totais (mm)
T1	0,0	1099,6	1099,6
T2	274,9	824,7	1099,6
T3	549,8	549,8	1099,6
T4	824,7	274,9	1099,6
T5	1099,6	0,0	1099,6

Nota: T1 – necessidade hídrica da cultura com 100% de AS; T2 – necessidade hídrica da cultura com 75% de AS e 25% de AP; T3 – necessidade hídrica da cultura com 50% de AS e 50% de AP; T4 – necessidade hídrica da cultura com 25% de AS e 75% de AP; e T5 – necessidade hídrica da cultura com 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Não foram realizadas adubações, visto que o emprego das mesmas poderia mascarar os dados relativos às análises de solo e planta ao final do experimento; dessa forma, as palmas receberam apenas o aporte de nutrientes presentes nas diluições de água produzida tratada.

4.6 Variáveis analisadas

4.6.1 Caracterização das diluições de água produzida tratada

No decorrer do experimento, após o devido tratamento da água produzida, foram coletadas, a cada dois meses, amostras dos cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5), sendo essas realizadas nos dias 20/02/2018, 21/04/2018, 20/06/2018 e 20/08/2018, totalizando quatro amostras por tratamento.

As amostras coletadas foram preservadas em caixas isotérmicas com gelo à temperatura de 4 ºC e transportadas até o Laboratório de Qualidade Ambiental (LQA) da UFERSA, sendo armazenadas em uma estufa incubadora refrigerada. Em seguida, essas amostras foram encaminhadas para o LASAP da UFERSA, com a finalidade de se realizar análises físico-químicas, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Rice et al., 2012).

- Determinação do potencial hidrogeniônico (pH) e da condutividade elétrica (CE)

Procedimento:
- Em um copo descartável, foi colocado, aproximadamente, 25 ml da água para analisar;
- Em seguida, foi feita a leitura no peagâmetro e anotado o valor;
- Levou-se a mesma amostra para o condutivímetro e anotou-se o valor da CE em dS m^{-1}.

- Determinação do sódio (Na^+) e potássio (K^+)

Procedimento:
- Ajustou-se o fotômetro de chama com a solução padrão de Na e K, efetuando a leitura das soluções padrão que estimaram a curva;
- Retirou-se 25 ml da amostra de água, sendo esta alocada em copo descartável;
- Em seguida, foi levada ao fotômetro de chama;
- Efetuaram-se as leituras na escala do aparelho;
- Se a leitura da amostra fosse superior ao último ponto da curva, seria necessário realizar uma nova diluição. Essa diluição poderia ser efetuada retirando-se 1 mL da amostra e acrescentando 9 mL de água deionizada.

- Determinação do cálcio (Ca^{2+})

Procedimento:
- Adicionou-se 25 ml da amostra em um Erlenmeyer de 125 ml;
- Adicionou-se à amostra 3 ml da solução de KOH a 10%;
- Foi colocada uma pitada de indicador Calcon (cor rosa);
- Realizou-se a titulação com a solução EDTA até o ponto de viragem de rosa para azul;
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do cálcio + magnésio ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$)

Procedimento:
- Adicionou-se 25 ml da amostra em um Erlenmeyer de 125 ml;
- Adicionou-se à amostra 4 ml da solução tampão (hidróxido de amônio + cloreto de amônio);
- Foi colocada uma pitada do indicador Negro de Ericromo;
- Realizou-se a titulação com a solução EDTA de 0,0125 M, até o ponto de viragem de rosa para azul;
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do magnésio (Mg^{2+})

Procedimento:
- Seu valor foi determinado pela diferença entre os valores de ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) e Ca^{2+}.

- Determinação do cloreto (Cl^-)

Procedimento:
- Em um Erlenmeyer colocou-se 25 ml da amostra de água em análise;
- Adicionou-se à amostra 3 gotas de cromato de potássio;
- Em seguida, titulou-se com nitrato de prata ($AgNO_3$) até obtenção do ponto de viragem (coloração avermelhada – cor de telha).

- Determinação do carbonato (CO_3^{2-})

Procedimento:
- Em um Erlenmeyer colocou-se 50 ml da amostra de água em análise;
- Adicionou-se 3 gotas de fenolftaleína;
- Se ficasse rosa, a amostra era titulada com solução de H_2SO_4 à 0,025 M, até a cor inicial (incolor);
- Em seguida, anotava-se o valor, sendo este multiplicado por 2;
- Caso não mudasse de cor, implicava na ausência de CO_3^{2-}.

- Determinação do bicarbonato (HCO_3^-)

Procedimento:
- Na mesma amostra que foi realizada a leitura do CO_3^{2-}, adicionou-se 3 gotas de alaranjado de metila;
- Titulou-se com H_2SO_4 à 0,025 M;
- A mudança da coloração ocorreu do amarelo claro para o amarelo cor de cenoura (alaranjado).

- Determinação da razão de adsorção de sódio (RAS)

- Determinada a partir das concentrações de Na^+, Ca^{2+} e Mg^{2+}, conforme descrito na Equação 5.

$$RAS = \frac{Na^+}{\left(\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}\right)} \quad (5)$$

Em que:

RAS - Razão de adsorção de sódio, $mmol_c\ L^{-1}$;

Na^+ - Concentração de sódio na amostra, $mmol_c\ L^{-1}$;

Ca^{2+} - Concentração de cálcio na amostra, $mmol_c\ L^{-1}$; e,

Mg^{2+} - Concentração de magnésio na amostra, $mmol_c\ L^{-1}$.

- Determinação de cobre (Cu), manganês (Mn), ferro (Fe), zinco (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb)

Procedimento:

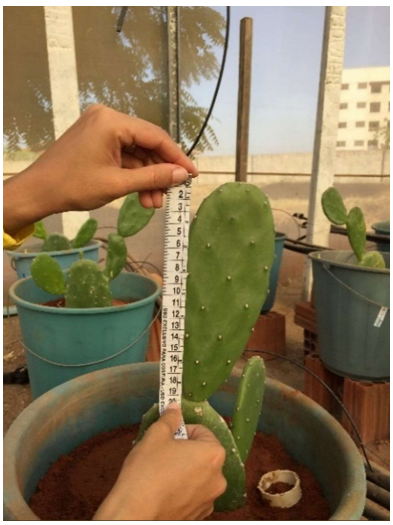
- Após o ajuste do espectrofotômetro de absorção atômica, conforme manual do equipamento, efetuou-se a leitura das soluções padrão que estimam a curva analítica;
- Logo em seguida, foram feitas as leituras de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e metais (Cr, Ni, Cd e Pb) a partir da amostra, sendo realizadas as trocas das lâmpadas de cátodo oco.

4.6.2 Determinação das características morfométricas e produtivas da palma forrageira irrigada com água produzida tratada e água subterrânea

As mensurações de crescimento da palma forrageira foram realizadas a cada oitenta dias (80, 160 e 240 dias) a começar após o plantio, observando os seguintes aspectos morfométricos: altura da planta (H), número de cladódios por planta (NCP), altura média dos cladódios (AMC), largura média dos cladódios (LMC), perímetro médio dos cladódios (PMC) e espessura média dos cladódios (EMC).

Para mensurar a H, levou-se em consideração a distância vertical do nível do solo até o ápice do cladódio superior. O NCP foi obtido considerando o somatório dos cladódios de 1ª e 2ª ordem de cada parcela, por meio de contagem direta. Para as demais características vegetativas (AMC, LMC, PMC e EMC), as medidas foram realizadas nos cladódios de 1ª e 2ª ordem que brotaram durante o cultivo.

As mensurações de H, AMC, LMC e PMC foram realizadas com fita métrica graduada em centímetros (Figura 10A); já a EMC foi determinada com o auxílio de um paquímetro, como visto na Figura 10B.

A.  B.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 10. Mensurações de crescimento da palma forrageira, utilizando fita métrica (A) e paquímetro (B)

A estimativa de produção de massa úmida do cladódio (MUC, kg) foi realizada no próprio local do experimento, aos 240 DAP, no dia 22 de setembro de 2018 (final do experimento). Para isso, os cladódios primários e secundários que brotaram em cada parcela foram retirados com o auxílio de uma faca amolada. Em seguida, utilizando-se de uma balança eletrônica digital com precisão de 0,1 g, pesou-se, individualmente, os cladódios colhidos, obtendo-se a MUC total para cada parcela.

4.6.3 Caracterização do estado nutricional da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada

Os cladódios primários e/ou secundários retirados de cada parcela foram colocados em sacos de papel etiquetados e encaminhados para o LASAP da UFERSA, para secagem em estufa de circulação forçada com temperatura regulada para 65ºC. O material permaneceu na estufa por 96 horas, realizando-se a medição da massa seca do cladódio (MSC, kg) a cada 24 h, até atingir peso constante.

Após a colheita dos cladódios que brotaram, foi feita uma escavação ao redor do cladódio basal da planta de cada vaso, com auxílio de uma espátula. Este procedimento foi executado com precisão para coletar a estrutura radicular, preservando-a o máximo possível (Figura 11).

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 11. Coleta do sistema radicular da palma, após o corte dos cladódios primários e secundários

Como as raízes continham solo, foram realizados os procedimentos de lavagem do material na seguinte sequência: água destilada corrente, solução de detergente neutro (1 mL L^{-1}), solução de ácido clorídrico (3 mL L^{-1}), água deionizada e secagem, conforme descritos por Carmo et al. (2000) e Prado (2008).

As raízes foram postas sobre uma superfície limpa e à sombra, ao ar livre, a fim de reduzir sua umidade. Em seguida, foram transferidas para sacos de papel etiquetados e colocadas para secar em estufa com circulação forçada, com temperatura regulada para 65ºC, permanecendo por 48 horas.

Após a secagem do material vegetal (cladódios e raízes), realizou-se a moagem das amostras em moinho tipo Wiley, equipado com peneira de 40 mesh, visando à obtenção de material de pequena granulometria e homogêneo, conforme recomendações de Carmo et al. (2000) e Bataglia et al. (1983).

A avaliação do estado nutricional da palma foi realizada no LQA da UFERSA, após secagem e moagem do material colhido (cladódios e raízes) de cada parcela.

O método de digestão da matéria seca e de extração dos nutrientes do tecido vegetal escolhido foi a digestão empregando-se forno micro-ondas como fonte de calor e HNO_3 (ácido nítrico) para digerir a matéria seca. Através desse método, determinaram-se os teores de macronutrientes, micronutrientes e metais pesados na planta.

Para aplicação dessa técnica de digestão com aquecimento por micro-ondas em tubos de teflon pressurizados, utilizou-se o Digestor MARS™ fabricado pela CEM Corporation, seguindo a metodologia proposta por Ferreira (2014a).

Transferiu-se 0,5 g de matéria seca para tubo de teflon de 100 mL, adicionou-se 5 mL de HNO_3 65% P.A. Colocaram-se os tubos no cilindro de aço de segurança do equipamento.

Introduziu-se o tubo no Digestor MARS™ e submeteu-o à temperatura de 170 a 180 ºC, pressão de 20 a 25 bar e potência de 600 a 1000 W por 20 minutos, manteve-se nesta temperatura por mais 15 minutos. Após desligar o Digestor MARS™ e esfriar os extratos, adicionou-se água destilada até completar o volume de 25 mL (extrato 1).

Realizou-se uma prova em branco adotando os mesmos procedimentos das demais amostras, excluindo-se apenas a colocação da matéria seca para digestão.

Os métodos de dosagem dos nutrientes nos extratos provenientes da digestão ou da extração foram realizados de acordo com Silva (2009).

- Determinação de sódio (Na^+) e potássio (K^+) por fotometria de chama

Princípio do método – O Na^+ e K^+ da solução aquosa são aspirados na chama ar – GLP, e as energias emitidas por esses elementos são proporcionais às suas concentrações (Silva, 2009).

Procedimento:
- Pipetou-se 1 mL do extrato 1, acrescentando 19 mL de água destilada (extrato 2);
- Ajustou-se o fotômetro de chama com a solução padrão de Na e K, efetuando a leitura das soluções que estimaram a curva;
- Efetuou-se a leitura do extrato 2;
- Foi realizada a prova em branco seguindo o mesmo procedimento da preparação da amostra para a leitura;
- Se a leitura do extrato 2 fosse superior ao último ponto da curva, seria necessário realizar uma nova diluição. Essa diluição poderia ser efetuada retirando-se 1 mL do extrato 2 e acrescentando 9 mL de água destilada (extrato 3).

- Determinação de cálcio (Ca^{2+}) e magnésio (Mg^{2+}) por espectrofotometria de absorção atômica (EAA)

A espectrofotometria de absorção atômica é uma das técnicas com menor interferência na análise. Entretanto, no caso de Ca^{2+} e Mg^{2+}, as presenças de fosfatos, Fe e Al interferem, sendo mascarados por Lantânio (La) ou Estrôncio (Sr) (Silva, 2009). Portanto é necessário adicionar uma das soluções de La ou Se (selênio) nos extratos antes da leitura.

Procedimento:

- Após o ajuste do espectrofotômetro, conforme manual do equipamento, efetuou-se a leitura das soluções padrão que estimam a curva analítica;
- Pipetou-se 1 mL do extrato 1 em recipiente plástico e adicionou-se 19 mL de água destilada (extrato 2);
- Em seguida, pipetou-se 1 mL do extrato 2 em copo descartável e adicionou-se 4 mL da solução de La 0,1%;
- Determinou-se Ca e Mg por EAA.
- Sempre que fosse realizado um procedimento de diluição na amostra (extrato 1), era necessário realizar o mesmo procedimento, na mesma proporção, com a prova em branco.
- Utilizou-se para esse procedimento a lâmpada de cátodo oco de Ca e Mg.

- Determinação de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e metais (Ni, Cd, Cr e Pb) por espectrofotometria de absorção atômica (EAA)

Procedimento:
- Após o ajuste do espectrofotômetro, efetuou-se a leitura das soluções padrão que estimam a curva analítica;
- Logo em seguida, foram feitas as leituras de micro e metais a partir do extrato 1;
- Caso houvesse necessidade de uma nova diluição para efetuar a leitura no EAA, utilizava-se o extrato 2 (1 mL do extrato 1, acrescentado 19 mL de água destilada); neste caso, era necessário realizar o mesmo procedimento, na mesma proporção, com a prova em branco.
- Utilizou-se a lâmpada de cátodo oco de Fe, Mn, Cu, Zn e de Ni, Cd, Cr e Pb.

4.6.4 Monitoramento dos atributos físico-químicos do solo após aplicação das diluições de água produzida tratada

Ao final do experimento, foram coletadas amostras simples do solo armazenado em cada uma das vinte e cinco parcelas experimentais, nas camadas de 0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, com auxílio de trado holandês (Figura 12).

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 12. Coleta de amostras simples do solo utilizado no experimento, com auxílio de trado holandês

As amostras foram armazenadas em sacos plásticos estéreis etiquetados e encaminhadas ao LQA da UFERSA, onde foram transferidas para depósitos de alumínio e deixadas em local ventilado e seco até completa dessecação ao ar. Posteriormente, o mesmo foi colocado sobre peça de couro de 60 x 60 cm e procedeu-se com o destorroamento da amostra com auxílio de um rolo de madeira, até desfazer os torrões maiores. Após destorroamento, o solo foi passado na peneira granulométrica com abertura de 2 mm. O material que passou pela peneira foi transferido para depósitos plásticos identificados, e encaminhados ao LASAP da UFERSA para realização das análises de solo.

- Determinação do potencial hidrogeniônico na relação de 1:2,5 (pH) e condutividade elétrica na relação de 1:2,5 (CEes)

Procedimento:

- Transferiu-se 10 cm^3 da amostra de solo para copo descartável;
- Em seguida, foram adicionados 25 mL de água deionizada;
- Agitou-se a mistura com um bastão de vidro, deixando-a em repouso por 1 hora;
- Para análise da CE foi feita a leitura, expressa em dS m^{-1}, no condutivímetro de bancada, após o repouso de 1 hora sem homogeneização da amostra;
- Logo em seguida, para medição do pH, a amostra foi agitada com bastão de vidro e efetuou-se a leitura utilizando o peagâmetro de bancada.

- Determinação da matéria orgânica (MO)

Procedimento:

- Macerou-se, aproximadamente, 20 g da amostra de solo no almofariz;
- A amostra foi passada na peneira de 80 mesh;
- Pesou-se 0,5 g do material resultante e transferiu-se para um erlenmeyer de 250 mL;
- Adicionou-se, em cada Erlenmeyer, 10 mL de dicromato de potássio 0,2 M;
- Foi colocada água nos condensadores, sendo estes colocados na boca do Erlenmeyer;
- Em seguida, foram transferidos para chapa aquecedora até o princípio de fervura;
- Após esfriar, foram adicionados 80 mL de água destilada, 1 mL de ácido ortofosfórico e 3 gotas do indicador difenilamina;
- Titulou-se com a solução de sulfato ferroso amoniacal 0,05 M;
- A viragem ocorre quando a cor azul desaparece, dando lugar à verde;
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do Fósforo (P)

Procedimento:

- Transferiu-se 10 cm^3 da amostra de solo para um erlenmeyer de 125 mL;
- Em seguida, foi adicionado 100 mL de solução extratora duplo ácida (HCl 0,5 M + H_2SO_4 0,0125 M), Mehlich-1;
- Agitou-se durante 5 minutos em agitador horizontal circular, deixando decantar durante uma noite;
- No dia posterior foi retirado 5 mL do sobrenadante e transferido para os copos descartáveis;
- Acrescentou-se 10 mL de Molibdato diluído e, em seguida, uma pitada de ácido ascórbico;
- Deu-se uma leve agitada manualmente;
- Repetiu-se os procedimentos acima para a curva de calibração;
- Deixou-se desenvolver a cor durante 1 hora;
- Após esse tempo, foi realizada a leitura no espectrofotômetro UV-VIS, a 660 nm.

- Determinação do sódio (Na^+) e potássio (K^+)

Procedimento:

- Após retirada a alíquota para determinação de P (extrato de Mehlich), utilizou-se 20 mL do sobrenadante para as determinações de Na^+ e K^+;
- O extrato foi alocado em copo descartável e levado ao fotômetro de chama;
- Efetuou-se as leituras na escala do aparelho;

- Se a leitura do extrato fosse superior ao último ponto da curva, seria necessário realizar uma nova diluição. Essa diluição poderia ser efetuada retirando-se 1 mL do extrato e acrescentando 9 mL de água destilada (extrato 2).

- Determinação do cálcio (Ca^{2+})

Procedimento:
- Utilizando-se o mesmo extrato (solo + solução KCl 1 mol $L^{-}1$), retirou-se uma alíquota de 25 mL do sobrenadante, sendo esta transferida para copo descartável;
- Adicionou-se 3 mL da solução de KOH a 10% e uma pitada do indicador Calcon;
- Realizou-se a titulação com a solução EDTA até o ponto de viragem de rosa para azul;
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do cálcio + magnésio ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$)

Procedimento
- Transferiu-se 10 cm^3 da amostra de solo para um Erlenmeyer de 125 mL;
- Adicionou-se 100 mL de solução de KCl 1 mol L^{-1};
- Em seguida, agitou-se durante 5 minutos em agitador horizontal circular, deixando decantar durante uma noite;
- No dia posterior, foi retirada uma alíquota de 25 mL do sobrenadante e alocada em copo descartável;
- Adicionou-se 4 mL da solução tampão pH 10 e uma pitada do indicador Negro de Ericromo;
- Posteriormente, realizou-se a titulação com a solução EDTA (ponto de viragem da cor rosa para a azul);
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do magnésio (Mg^{2+})

Procedimento:
- A determinação de Mg^{2+} deu-se através da diferença entre os resultados de ($Ca^{2+} + Mg^{2+}$) e Ca^{2+}.

- Determinação da acidez potencial (H+ Al)

Procedimento:

- Primeiramente, adicionou-se 5 cm^3 da amostra de solo em erlenmeyer de 125 mL;
- Em seguida, foi adicionado 75 mL de solução de acetato de cálcio 0,5 M com pH 7,1 - 7,2 (extrato);
- O extrato foi agitado algumas vezes durante o dia, deixando-o decantar durante a noite;
- Após agitação e repouso, foi retirada uma alíquota de 25 mL do extrato, sendo transferida para um béquer de 100 mL;
- Adicionou-se três gotas de fenolftaleína como indicador;
- Titulou-se com solução de NaOH a 0,025 M, onde o líquido, antes incolor, apresentou uma cor rosa persistente.

- Determinação da capacidade de troca catiônica (CTC)

- Obtida pelo somatório dos valores da soma de bases (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+} e K^{+}) e o valor da acidez potencial (H + Al).

- Determinação da porcentagem de sódio trocável (PST)

- Indicativo da proporção de Na^{+} adsorvida no complexo de troca de cátions do solo, foi calculado utilizando-se a Equação 6.

$$PST = \frac{Na^{+}}{CTC}\ 100 \qquad (6)$$

Em que:

PST - Porcentagem de sódio trocável, %;

Na^{+} - Sódio trocável, $cmol_c\ dm^{-3}$;

CTC - Capacidade de troca catiônica do solo, $cmol_c\ dm^{-3}$.

- Determinação de ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb)

Procedimento:

- Transferiu-se 0,5 g da amostra de solo para um erlenmeyer de 125 mL;
- Em seguida, foram adicionados 25 mL da solução extratora duplo-ácida (Mehlich-1);

- Agitou-se a mistura em agitador horizontal circular, com velocidade de 120 rpm, durante 5 min;
- Após agitação, a suspensão foi filtrada em papel filtro de 110 mm;
- Separou-se o filtrado para efetuar as leituras no espectrofotômetro de absorção atômica;
- Após o ajuste do equipamento, conforme o manual, efetuou-se a leitura das soluções padrão que estimam a curva analítica;
- Logo em seguida, foram feitas as leituras de micronutrientes (Fe, Mn, Cu e Zn) e metais (Cr, Ni, Cd e Pb) a partir do filtrado.

As recomendações de amostragem e os procedimentos das análises de solo, descritos anteriormente, seguiram os padrões estabelecidos por Teixeira et al. (2017).

4.6.5 Determinação do fator de translocação (FT) e fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada

O fator de translocação (FT) e bioacumulação (FB) são parâmetros utilizados para detectar a capacidade hiperacumuladora das plantas em relação a diversos elementos que podem ser absorvidos pelas mesmas.

Para cada elemento químico detectado no tecido vegetal da palma forrageira, foram determinados o FT e o FB, conforme proposto por Fayiga & Ma (2006) e Yoon et al. (2006), empregando-se as Equações 7 e 8, respectivamente.

$$FT = \frac{CC}{CR} \quad (7)$$

Em que:

FT - Fator de translocação de cada elemento químico, adimensional;

CC - Concentração dos elementos nos cladódios;

CR - Concentração dos elementos nas raízes.

$$FB = \frac{CP}{CS} \quad (8)$$

Em que:

FB - Fator de bioacumulação de cada elemento químico, adimensional;

CP - Concentração dos elementos na planta (cladódios + raízes);

CS - Concentração dos elementos no solo do vaso.

De acordo com os valores do fator de translocação calculado, as plantas podem ser classificadas como: a) eficientes em translocar elementos, quando o fator de translocação de elemento testado da raiz para parte aérea - FT > 1; e b) ineficientes quando o FT < 1. Já com relação ao fator de bioacumulação, as plantas podem ser classificadas como: a) acumuladoras, quando o fator de bioacumulação - FB > 1; b) indicadoras, quando FB = 1; e, c) exclusoras, quando FB < 1 (Fayiga & Ma, 2006; Yoon et al., 2006).

4.7 Experimentação e análises estatísticas

Os dados das características físico-químicas das diluições de água produzida tratada foram submetidos à estatística descritiva (média e desvio padrão).

Para os dados de solo, o experimento foi montado no esquema de parcelas subdivididas, tento nas parcelas os tratamentos e nas subparcelas as profundidades de amostragem (0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20 m). Realizou-se a média dos valores dos dados de solo das duas profundidades.

Para análise estatística dos dados referentes ao solo e à planta, o delineamento utilizado foi em blocos casualizados com cinco repetições. A Equação 9 refere-se ao modelo estatístico do delineamento em blocos casualizados.

$$y_{ij} = \mu + x_i + xx_j + e_{ij} \quad (9)$$

Em que:

y_{ij} - Observação do tratamento x_i (i = 1, 2, ..., t) no bloco xx_j (j = 1, 2, ..., r);

xx_j - Efeito do bloco xx_j.

Os dados coletados de solo e planta foram submetidos à análise de variância pelo Teste F a 5 % de probabilidade; quando significativos, os mesmos foram submetidos ao Teste de Tukey a 5 % de probabilidade. Além disso, realizou-se os contrastes ortogonais para comparação múltipla das médias.

De acordo com Corrente et al. (2001), define-se um contraste como uma função linear estimável, conforme apresentada na Equação 10.

$$Y = \sum_{i=1}^{I} c_i \mu_i \quad (10)$$

Em que:

c_i - Coeficiente a ser atribuído a μ_i;

μ_i - Média do tratamento i.

De forma que,

$$\sum_{i=1}^{I} c_i = 0 \quad (11)$$

Dois contrastes $Y_h = \sum c_{hi}\ \mu_i$ e $Y_h = \sum c_{h'i}\mu_i$, com $h \neq h'$ para h = 1, ..., I-1, são ortogonais quando $\{c_{hi}, c_{h'i}\} = 0$.

Cada contraste gera uma hipótese a ser testada e está associado a uma soma de quadrados com 1 grau de liberdade. A soma de quadrados para um contraste Y_h é dada pela Equação 12.

$$SQ\ Y_h = \frac{r\ Y_h^2}{\sum_{i=1}^{I} c_{hi}^2} \quad (12)$$

Em que:

h = 1, ..., I-1, sendo que $Y_h = \sum c_{hi}\ \bar{y}_i$ é um estimador não tendencioso de Y_h.

Devido a ortogonalidade dos contrastes ocorre que: $\sum SQY_h$ é a soma de quadrados de tratamentos com (I-1) graus de liberdade (Corrente et al., 2001).

Dessa forma, os contrastes testados foram: a) tratamento T5 versus demais tratamentos (T1, T2, T3 e T4); b) tratamento T4 versus tratamentos T1, T2 e T3; c) tratamento T3 versus tratamentos T1 e T2; e, d) tratamento T2 versus tratamento T1. A combinação dos contrastes com as médias dos tratamentos foi expressa da seguinte forma, conforme proposto por Costa et al. (2018):

C1 = 12 m1 + 12 m2 + 8 m3 +10 m4 - 42 m5
C2 = 30 m1 + 30 m2 + 20 m3 - 80 m4
C3 = 6 m1 + 6 m2 - 12 m3

C4 = 6 m1 - 6 m2

Para realização das análises estatísticas foi utilizado o programa computacional estatístico Sisvar 5.6 (Sistema para Análise de Variância) desenvolvido por Ferreira (2014b).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização físico-química das diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Na Tabela 9 estão apresentados os valores médios e desvios padrão referentes a realização de quatro coletas de amostras dos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 no decorrer do experimento, assim como os padrões estabelecidos pela legislação ambiental (COEMA nº 2/2017) e outros autores.

Tabela 9. Valores médios e desvio padrão das características físico-químicas referentes às diluições da água produzida tratada, em comparação com valores padrões estabelecidos pela legislação ambiental e outros autores

Atributos físico-químicos	Média e desvio padrão dos tratamentos					Padrões
	T1	T2	T3	T4	T5	
pH	8,83 ± 0,37	8,87 ± 0,54	8,82 ± 0,54	8,78 ± 0,44	8,78 ± 0,51	5,0 - 9,0[(1)]
CE (dS m^{-1})	0,52 ± 0,07	0,82 ± 0,52	0,69 ± 0,26	0,58 ± 0,10	0,79 ± 0,50	3,0[(1)]
Na^+ (mmolc L^{-1})	5,33 ± 2,11	4,52 ± 0,93	3,57 ± 0,72	3,29 ± 0,69	2,99 ± 0,78	< 3,0[(2)]
K^+ (mmolc L^{-1})	0,68 ± 0,06	0,73 ± 0,06	0,76 ± 0,06	0,83 ± 0,05	0,90 ± 0,05	0,05[(3)]
Ca^{2+} (mmolc L^{-1})	0,96 ± 0,38	1,31 ± 0,38	1,41 ± 0,47	1,61 ± 0,46	1,77 ± 0,84	1,0 - 5,0[(2)]
Mg^{2+} (mmolc L^{-1})	0,48 ± 0,19	1,07 ± 0,70	1,54 ± 0,70	2,30 ± 1,03	2,74 ± 0,95	< 5,25[(2)]
Cl^- (mmolc L^{-1})	2,45 ± 0,44	5,20 ± 4,04	3,60 ± 1,75	3,30 ± 0,48	4,95 ± 3,97	< 2,0[(2)]
CO_3^{2-} (mmolc L^{-1})	0,85 ± 0,50	0,75 ± 0,41	1,40 ± 0,59	1,05 ± 0,30	1,30 ± 0,60	0,01[(3)]
HCO^{3-} (mmolc L^{-1})	2,75 ± 0,31	3,13 ± 0,31	3,08 ± 0,50	3,70 ± 0,73	3,53 ± 0,50	< 0,7[(2)]
RAS (mmolc L^{-1})	6,34 ± 2,36	4,21 ± 0,33	3,00 ± 0,48	2,39 ± 0,38	2,02 ± 0,41	15,0[(1)]
Fe (mg L^{-1})	0,007 ± 0,01	0,014 ± 0,02	0,006 ± 0,01	0,007 ± 0,01	0,010 ± 0,02	5,0[(4)]
Mn (mg L^{-1})	0,005 ± 0,01	0,013 ± 0,02	0,012 ± 0,02	0,016 ± 0,03	0,012 ± 0,02	0,2[(4)]
Cu (mg L^{-1})	0,003 ± 0,01	0,004 ± 0,01	0,004 ± 0,01	0,004 ± 0,01	0,003 ± 0,01	0,2[(4)]
Zn (mg L^{-1})	0,003 ± 0,01	0,009 ± 0,01	0,006 ± 0,01	0,015 ± 0,01	0,006 ± 0,01	2,0[(4)]
Cr (mg L^{-1})	0,013 ± 0,01	0,019 ± 0,02	0,015 ± 0,02	0,012 ± 0,02	0,011 ± 0,01	0,1[(4)]
Ni (mg L^{-1})	0,000 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,002 ± 0,00	0,000 ± 0,00	0,000 ± 0,00	0,2[(4)]
Cd (mg L^{-1})	0,012 ± 0,01	0,011 ± 0,01	0,005 ± 0,01	0,008 ± 0,01	0,004 ± 0,01	0,01[(4)]
Pb (mg L^{-1})	0,120 ± 0,10	0,080 ± 0,10	0,015 ± 0,02	0,088 ± 0,08	0,055 ± 0,06	5,0[(4)]

Nota: pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica; Na^+ - sódio; K^+ - potássio; Ca^{2+} - cálcio; Mg^{2+} - magnésio; Cl^- - cloreto; CO_3^{2-} - carbonato; HCO_3^- - bicarbonato; RAS - razão de adsorção de sódio; Fe - ferro; Mn - manganês; Cu - cobre; Zn - zinco; Cr - cromo; Ni - níquel; Cd- cádmio; Pb- chumbo; [(1)]Resolução COEMA nº 2/2017, referente aos critérios para reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais; [(2)]Ribeiro et al. (1999); [(3)]Almeida (2010) e [(4)]Léon Suematsu & Cavallini (1999).
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Analisando a Tabela, verifica-se que a água produzida tratada apresenta resultados semelhantes ao da água subterrânea, o que pode ser explicado devido a formação geológica e a localização geográfica. A área onde se localiza o poço tubular de onde provém a água

subterrânea e a área do campo de petróleo do qual foi oriunda a água produzida estão localizadas sob as mesmas formações geológicas – calcários da Formação Jandaíra e arenitos da Formação Açu – ambas reunidas no grupo Apodi (Angelim et al., 2006).

O potencial hidrogeniônico é um parâmetro indicativo do grau de acidez ou alcalinidade do meio. No caso de águas de irrigação, o pH normal está compreendido entre 6,5 e 8,4 (Almeida, 2010). O pH do presente estudo encontra-se fora desse intervalo normal.

Entretanto, os valores médios do pH das diluições de água produzida tratada encontram-se dentro da faixa recomendada (entre 5,0 e 9,0) pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017), referente ao reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. Ainda, os valores médios de pH de todos os tratamentos foram superiores ao limite de 7,5, classificando o risco de obstrução de gotejadores como severo, devido à possibilidade de precipitação de sais (Bucks et al., 1979).

Ao comparar as diluições, notou-se que a condutividade elétrica variou de 0,52 a 0,82 dS m^{-1}, sendo este resultado inferior ao limite de 3 dS m^{-1} determinado pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017) para reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. Segundo Capra & Scicolone (1998), o risco de obstrução de gotejadores foi considerado baixo com relação a essa característica para todas as diluições, apresentando valores médios inferiores ao limite estabelecido de 1,0 dS m^{-1}.

Quanto ao risco de salinidade, conforme classificação proposta por Richards (1954), os tratamentos T1, T3 e T4 se enquadram na classe C_2, águas de média salinidade (CE entre 0,25 - 0,75 dS m^{-1}), tais diluições são adequadas ao cultivo de plantas moderadamente tolerantes aos sais. Enquanto os tratamentos T2 e T5 foram enquadrados na classe C_3, águas de alta salinidade (CE entre 0,75 - 2,25 dS m^{-1}), devendo ser utilizada na irrigação de espécies vegetais de alta tolerância aos sais.

Com relação ao sódio, observa-se que os teores desse elemento reduziram à medida que se aumentou a proporção de água produzida tratada (T1 ao T5). O nível de danos às culturas foi classificado como médio para os tratamentos T1 ao T4, apresentando valores dentro da faixa de 3,0 a 7,8 $mmol_c$ L^{-1}, enquanto o tratamento T5 não apresentou nenhum dano às culturas ($Na^+ < 3,0$ $mmol_c$ L^{-1}) para essa característica (Ribeiro et al., 1999). Os valores médios de sódio para todas as diluições da água produzida tratada estão abaixo do limite de 40 $mmol_c$ L^{-1}, estabelecido por Almeida (2010) para águas destinadas à irrigação de cultivos agrícolas.

Já os teores médios de potássio aumentaram a medida que a água produzida se tornava menos diluída (T1 ao T5). As concentrações desse elemento para todas as diluições foram superiores ao limite de 0,05 $mmol_c$ L^{-1}, apresentado por Almeida (2010) para águas destinadas à irrigação de cultivos agrícolas.

Os teores médios de cálcio das diluições estão dentro da faixa de 1,0 a 5,0 $mmol_c\ L^{-1}$ ou abaixo dela (tratamento T5), não apresentando danos às culturas relacionados à qualidade da água conforme proposto por Ribeiro et al (1999). Já os teores médios de magnésio foram inferiores ao limite de 5,25 $mmol_c\ L^{-1}$ estabelecido pelos referidos autores, sem risco de danos às culturas. Segundo Capra & Scicolone (1998), as concentrações médias de cálcio e magnésio representam baixo risco de obstrução de gotejadores (Ca^{2+} < 12,5 $mmol_c\ L^{-1}$ e Mg^{2+} < 2,0 $mmol_c\ L^{-1}$); exceto o tratamento T5 que apresentou risco moderado (2,0 a 7,5 $mmol_c\ L^{-1}$) para magnésio.

Verificou-se que a relação sódio/cálcio foi de 5,55, 3,45, 2,53, 2,04 e 1,69 para os tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, e que em nenhum dos tratamentos a relação sódio/cálcio foi superior ao limite (3:1) estabelecido por Ayers & Westcot (1999), indicando pouco risco de redução na infiltração de água no solo, devido à dispersão das argilas e entupimento dos poros da superfície do solo.

Os teores médios de cloreto das diluições variaram de 2,45 a 5,20 $mmol_c\ L^{-1}$. Dessa forma, o nível de danos às culturas relacionado à qualidade da água de irrigação foi considerado como médio, pois os valores estão dentro da faixa de 2,0 a 8,5 $mmol_c\ L^{-1}$ estabelecida por Ribeiro et al. (1999).

O cloreto, aliado à presença de carbonato e bicarbonato de cálcio, favorece a formação de precipitados químicos, tornando o solo mais alcalino e elevando o pH, o que consequentemente causa diversos efeitos impactantes aos demais elementos presentes no mesmo (Coelho, 2013).

As concentrações de carbonato foram superiores ao limite de 0,1 $mmol_c\ L^{-1}$ considerado usual para água de irrigação, segundo Almeida (2010). Já os valores de bicarbonato estiveram dentro da faixa (0 a 10 $mmol_c\ L^{-1}$) recomendada pelo mesmo autor. Considerando, ainda, os teores médios de bicarbonato, observa-se que o nível de danos às culturas, relacionado à qualidade da água para irrigação, foi classificado como severo (HCO_3^- > 3,0 $mmol_c\ L^{-1}$) para as diluições de água produzida tratada; exceto para o tratamento T1 que apresentou nível moderado (entre 0,7 e 3,0 $mmol_c\ L^{-1}$), conforme proposto por Ribeiro et al. (1999).

Nas águas que contêm concentrações elevadas de íons de bicarbonato, há tendência de precipitação do cálcio e do magnésio, sob a forma de carbonatos, reduzindo, assim, a concentração de cálcio e magnésio na solução do solo e, consequentemente, aumentando a proporção de sódio, uma vez que a solubilidade do carbonato de sódio é superior a de cálcio e de magnésio (Bernardo et al., 2006; Mantovani et al., 2006).

Os valores médios da razão de adsorção de sódio variaram de 2,02 a 6,34. Esses valores foram inferiores ao limite de 15 $mmol_c\ L^{-1}$ estabelecido pela Resolução COEMA nº 02/2017

(Ceará, 2017) para reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. Já com relação aos danos às culturas referentes à qualidade da água de irrigação, essa característica apresentou nível de danos severo (RAS > 6 $mmol_c$ L^{-1}) para T1, moderado (3 < RAS < 6 $mmol_c$ L^{-1}) para T2 e T3 e sem danos (RAS < 3 $mmol_c$ L^{-1}) para T4 e T5 (Ribeiro et al., 1999).

Quanto ao risco de sodicidade proposto por Richards (1954), levando-se em consideração os valores de RAS, todos os tratamentos enquadraram-se na classe S1 (baixa sodicidade), podendo esta água ser usada para irrigação na maioria dos solos, com pouca probabilidade de se atingir níveis perigosos de sódio trocável.

Os teores médios de ferro e manganês variaram de 0,006 a 0,014 mg L^{-1} e de 0,005 a 0,016 mg L^{-1}, respectivamente. Esses valores foram inferiores aos limites de 5,0 mg L^{-1} para ferro e 0,20 mg L^{-1} para manganês, estabelecidos por Léon Suematsu & Cavallini (1999) quanto a fitotoxicidade das plantas em relação a qualidade da água de irrigação. Os referidos autores afirmam que o excesso de ferro pode contribuir para a acidificação do solo e redução da disponibilidade de fósforo e molibdênio; já o manganês pode causar maior fitotoxicidade às culturas em solos ácidos. Os valores de ferro e manganês também estão abaixo dos valores máximo admissíveis de 15,0 e 1,0 mg L^{-1}, respectivamente, considerados pela Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) como usuais para reuso de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. O risco de obstrução de gotejadores proporcionado pelo ferro (Fe < 0,20 mg L^{-1}) e manganês (Mn < 0,10 mg L^{-1}) é considerado baixo em todas as diluições de água produzida tratada, conforme critérios de Bucks et al. (1979).

As concentrações médias de cobre e zinco oscilaram de 0,003 a 0,004 mg L^{-1} e de 0,003 a 0,015 mg L^{-1}, respectivamente. Todas foram inferiores aos limites de 0,20 e 2,0 mg L^{-1} estabelecidos por Léon Suematsu & Cavallini (1999) para cobre e zinco, quanto a qualidade da água de irrigação relacionada à fitotoxicidade das plantas. Segundo os referidos autores, a toxicidade do zinco é reduzida em solos orgânicos, de boa textura e com pH acima de 6,0. As concentrações médias também estão abaixo dos limites de 1,0 mg L^{-1} para o cobre e 5,0 mg L^{-1} para o zinco, considerados usuais para reuso de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais (Ceará, 2017).

Nas diluições da água produzida tratada, as concentrações médias de cromo variaram de 0,011 a 0,019 mg L^{-1}. Esses valores foram inferiores ao limite de fitotoxicidade às plantas de 0,10 mg L^{-1}, estabelecido por Léon Suematsu & Cavallini (1999). Os autores afirmam que este elemento não é essencial ao crescimento das plantas. As concentrações também estão abaixo do valor de 0,1 estabelecido pela Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) para reuso de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais.

Os valores médios de níquel, nas diluições da água produzida tratada, variaram de 0 a 0,002 mg L^{-1}, sendo inferiores ao limite de 0,20 mg L^{-1} apresentado por Léon Suematsu & Cavallini (1999). Os referidos afirmam, ainda, que sua toxidez é reduzida em solos com pH neutro ou alcalino. Os teores de níquel também estão abaixo do limite de 2,0 mg L^{-1}, estabelecido pela Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) para reuso de água com fins agrícolas e florestais.

Os teores médios de cádmio foram inferiores ao limite de 0,01 estabelecido por Léon Suematsu & Cavallini (1999), exceto para os tratamentos T1 e T2 (> 0,01 mg L^{-1}). Os referidos autores alertam sobre o seu potencial de acumulação, tanto no solo como na planta. Os valores médios também estão abaixo do limite de 0,2 mg L^{-1}, recomendado para reuso de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais (Ceará, 2017).

As concentrações de chumbo foram inferiores ao limite de fitotoxicidade às plantas de 5,0 mg L^{-1}, apresentado por Léon Suematsu & Cavallini (1999). Conforme os referidos autores, esse elemento pode inibir o crescimento de certas plantas em concentrações muito altas. Os teores de chumbo também foram inferiores ao limite de 0,5 mg L^{-1}, sendo considerados pela resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) para reuso de efluentes não sanitários em cultivos agrícolas e florestais.

Observa-se que os maiores teores de chumbo foram encontrados no tratamento T1 (somente água subterrânea). O trabalho de Preston et al. (2014) comprova que os solos do Estado do Rio Grande Norte apresentam, naturalmente, a presença de metais pesados, incluindo o Pb. Como em Mossoró a maior parte da água subterrânea é oriunda de poço, essas também podem apresentar teores de Pb, oriundos das rochas e solos.

Analisando, de modo geral, os atributos físico-químicos das diluições de água produzida tratada, verifica-se que os teores de Na^+, Cl^-, CO_3^{2-} e HCO_3^- encontrados podem limitar a utilização dessa água para fins de irrigação, devido, principalmente, a formação de precipitados químicos e risco de fitotoxicidade à cultura.

5.2 Avaliação dos atributos físico-químicos do solo após irrigação com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

A Tabela 10 apresenta os valores médios, coeficientes de variação (%), erros-padrão e probabilidades obtidos com o teste de Tukey, como também os contrastes ortogonais de médias dos tratamentos aplicados de acordo com as variáveis:potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), matéria orgânica (MO), fósforo

(P), potássio (K^+), sódio (Na^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), acidez potencial (H+Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de sódio trocável (PST).

Pode-se observar que o pH do solo não apresentou efeito significativo na probabilidade de 5%, em relação aos tratamentos testados. No entanto, ocorreu efeito significativo para o contraste C4 a um nível de 5% de probabilidade, indicando que o pH do tratamento T2 diferiu estatisticamente do T1.

Conforme os dados obtidos no estudo, constatou-se que os valores do pH variaram de 7,05 a 7,49, apresentando uma média entre os tratamentos de 7,32. De acordo com Ribeiro et al. (1999), o valor médio do pH do solo utilizado no experimento quanto à classificação química categoriza-se como alcalinidade fraca (7,1 – 7,8), e quanto à classificação agronômica como pH muito alto (> 7,0).

O pH do solo é um dos principais fatores que influenciam o crescimento e desenvolvimento das plantas, onde os valores ótimos encontram-se na faixa de 5,5 - 6,5. Os macronutrientes apresentam maior disponibilidade em pH na faixa de 6,0 - 6,5; enquanto os micronutrientes, com exceção do molibdênio (Mo), são mais disponíveis em condições de pH mais ácidos (Novais et al., 2007). No solo em estudo o valor médio do pH encontra-se fora dessas faixas, o que pode afetar a disponibilidade dos nutrientes para as plantas.

Com relação à CEes do solo, notou-se que os valores pouco variaram com as diluições utilizadas, apresentando média entre os tratamentos igual a 0,23 dS m^{-1}.

Para todos os tratamentos, a CEes do solo apresentou-se abaixo de 2 dS m^{-1}, valor acima do qual os solos são considerados salinos, conforme a Sociedade Americana de Ciência de Solo (Richards, 1954). Nesses casos, o crescimento e o desenvolvimento das plantas são diretamente afetados pela ocorrência de toxidez de alguns íons, desequilíbrios nutricionais e, principalmente, pelas dificuldades na absorção de água e nutrientes ocasionadas pelo aumento da pressão osmótica da solução do solo (Marschner, 1995).

O aporte de MO do solo apresentou valor médio igual a 5,09 g kg^{-1}, sendo considerado como muito baixo (≤ 7,0 g kg^{-1}) para todos os tratamentos, conforme a classificação de interpretação de fertilidade do solo estabelecida por Ribeiro et al. (1999).

A adição de MO ao solo tem influência sobre o pH do mesmo, resultando em aumento ou redução, dependendo da predominância dos processos que consomem ou liberam H^+. O aumento do pH pode ser em decorrência da redução da atividade de H^+ resultante, principalmente, da liberação de cátions metálicos; mineralização de formas orgânicas de N e descarboxilação dos ácidos orgânicos (Yan et al., 1996; Pocknee & Sumner, 1997).

Tabela 10. Atributos físico-químicos do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Tratamentos	Atributos físico-químicos do solo										
	pH	CE_{es}	MO	P	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	H+Al	CTC	PST
		dS m^{-1}	g kg^{-1}	.....mg dm^{-3}.....			.....$cmol_c$ dm^{-3}.....				%
T1	7,47	0,22	4,85	1,58	40,20	203,12	0,42a	0,30a	0,02	1,51	40,98b
T2	7,05	0,24	5,36	1,64	39,79	178,21	0,30a	0,45abc	0,05	1,61	40,45ab
T3	7,46	0,22	6,37	1,36	45,51	165,33	0,43a	0,40ab	0,02	1,78	41,40b
T4	7,49	0,24	5,02	2,01	44,18	149,62	0,46a	0,52bc	0,02	1,63	29,77ab
T5	7,13	0,22	3,85	1,63	43,67	124,36	0,32a	0,62c	0,01	1,66	27,32a
Média	7,32	0,23	5,09	1,64	42,67	164,13	0,38	0,46	0,02	1,64	35,98
CV (%)	4,12	31,74	34,86	36,87	16,20	22,46	22,35	22,80	129,32	20,95	19,17
Erro-padrão	0,13	0,03	0,79	0,27	3,09	16,48	0,04	0,05	0,01	0,15	3,08
Probabilidade	NS	NS	NS	NS	NS	0,04*	0,03*	0,01**	NS	NS	0,01**
Probabilidade dos contrastes (decimal)											
Contraste $C_{1: T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	NS	NS	NS	0,01*	NS	0,01**	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{2: T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,02*	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{3: T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{4: T2\ Vs\ T1}$	0,04*	NS	NS	NS	NS	NS	0,04*	0,04*	NS	NS	NS

Nota: T1 – Somente água subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; pH – Potencial hidrogeniônico; CE_{es} – Condutividade elétrica do extrato de saturação do solo; MO – Matéria orgânica; P – Fósforo; K^+ – Potássio; Na^+ – Sódio; Ca^{2+} – Cálcio; Mg^{2+} – Magnésio; H+Al – Acidez potencial; CTC – Capacidade de troca catiônica; PST – Porcentagem de sódio trocável. $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e * Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Com relação à concentração de P no solo estudado, apesar de não haver efeito significativo para as diluições aplicadas de água produzida tratada e nem para os contrastes ortogonais, o maior valor de P foi observado para o tratamento T4 (2,01 mg dm^{-3}), quando comparadas as médias entre os tratamentos.

De acordo com Ribeiro et al. (1999), na interpretação da disponibilidade de P, devem ser utilizadas medidas relacionadas com a capacidade tampão, com o teor de argila ou o valor de P remanescente dos solos. O teor de argila no solo estudado foi em torno de 13% (Tabela 6), dessa forma, o teor de P disponível no solo é classificado como "muito baixo" ($\leq$ 2,7 mg dm^{-3}).

Os baixos teores de P no solo podem ser explicados devido ao pH elevado, tendo como consequência baixos teores de Fe^{2+} e Al^{3+}, que geralmente são os responsáveis por grande parte da sorção de P. Além disso, com o aumento do pH, a carga superficial de partículas do solo torna-se cada vez mais negativa, aumentando a repulsão (menor adsorção) entre fosfato e a superfície adsorvente, diminuindo o potencial eletrostático do plano de adsorção (Barrow, 1974; Haynes, 1984).

Para o K^+, a média entre os tratamentos foi igual a 42,67 mg dm^3. De acordo com a classificação elaborada pela Comissão de Fertilidade do Solo do Estado de Minas Gerais - CFSEMG (Ribeiro et al., 1999), o teor de K^+ no solo estudado pode ser classificado como baixo (16 - 40 mg dm^{-3}) para os tratamentos T1 e T2 e como médio (41 - 70 mg dm^{-3}) para os demais tratamentos.

O K^+, devido ao fato de ser um íon monovalente, apresenta alta mobilidade no solo e pode perder-se facilmente por lixiviação, especialmente em solos de baixa CTC (como é o caso do solo em estudo) e que receberam aporte elevado de Ca e Mg, elementos que competem com o K^+ pela adsorção ao solo (Novais et al., 2007).

Observando os resultados da análise de variância, pode-se verificar que houve diferença estatística a 5% de probabilidade para os teores médios de Na^+ dos tratamentos testados. Verificando os contrastes ortogonais, ocorreu efeito significativo a 5% de probabilidade para o contraste C1, indicando que o teor de Na^+ do T5 diferiu dos demais tratamentos.

O menor teor de Na^+ no solo foi observado para o tratamento T5 (124,36 mg dm^{-3}). Esse fato pode ser explicado devido a água produzida tratada conter um baixo teor desse elemento, como apresentado anteriormente na análise de água (Tabela 9). Resultado distinto foi obtido por Burkhardt et al. (2015b), esses autores constataram que com o aumento da concentração de água produzida, o Na^+ no solo aumentou, enquanto Mg^{2+} e Ca^{2+} diminuíram.

O Na^+ é um cátion que promove a expansão da dupla camada difusa e, consequentemente, acarreta a dispersão dos coloides do solo, seguida de sua movimentação ao longo do perfil do

solo. Uma vez dispersos e em movimento, os coloides podem obstruir os poros, o que interfere sobre as propriedades físicas (condutividade hidráulica, infiltração, aeração) e, desta forma, sobre a capacidade produtiva dos solos (Novais et al., 2007). Além disso, altos teores de Na^+ podem levar a possíveis deficiências nutricionais de Ca^{2+} e Mg^{2+}, que são deslocados e ficam indisponíveis pois as raízes não conseguem penetrar na subsuperfície (Burkhardt et al., 2015a).

Apesar do Na^+ geralmente não ser considerado essencial às plantas, Epstein & Bloom (2006) informam, em sua revisão, que o Na^+ é um micronutriente requerido pelas plantas com via CAM de fixação de carbono, como a palma forrageira, pois é essencial para a regeneração do ácido fosfoenolpirúvico, substrato da primeira carboxilação nessa via. Ainda segundo esses autores, a deficiência de Na^+ induz, nessas plantas, clorose e necrose, além de falha na formação de flores. Dessa forma, o Na^+ em quantidades adequadas pode ser considerado benéfico para algumas espécies de plantas.

Analisando as concentrações médias de Ca^{2+} no solo, verificou-se que ocorreu efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade em relação aos tratamentos estudados. Com relação aos contrastes, foi constatado que houve significância ao nível de 5% de probabilidade para o contraste ortogonal C4, indicando que o teor de Ca^{2+} do tratamento T2 diferiu do T1.

O maior teor de Ca^{2+} foi observado para o tratamento T4, o que pode estar relacionado ao maior valor de pH do solo verificado nesse tratamento, visto que a elevação do pH acarreta a complexação ou troca dos íons H e Al, por cátions básicos como o Ca^{2+}, aumentando assim a saturação por bases (Amaral et al., 2004).

De acordo com a CFSEMG (Ribeiro et al., 1999), os valores de Ca^{2+} do solo estudado são caracterizados como muito baixos ($\leq$ 0,40 $cmol_c\ dm^{-3}$) para os tratamentos T2 e T5, e como baixos (0,41 - 1,20 $cmol_c\ dm^{-3}$) para os tratamentos T1, T3 e T5. Os baixos teores de Ca^{2+} podem ser atribuídos ao incremento da concentração de Na^+ no complexo de troca, deslocando o Ca^{2+}, como explicado anteriormente.

Com relação aos teores de Mg^{2+}, constatou-se que houve significância a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey quando comparados os tratamentos. O tratamento T5 apresentou a maior média (0,62 $cmol_c\ dm^{-3}$) entre os tratamentos. Com relação aos contrastes ortogonais, foi verificada diferença significativa a 1% de probabilidade para o Contraste C1, indicando que o teor de Mg^{2+} do tratamento que recebeu somente água produzida tratada, T5, difere estatisticamente dos demais. Ainda, houve efeito significativo a 5% de probabilidade para os contrastes C2 e C4, indicando que o teor de Mg^{2+}do tratamento T4 difere de T1, T2 e T3; e que, também, o teor de Mg^{2+} do tratamento T2 difere de T1.

Do ponto de vista agronômico, para os tratamentos T1, T2 e T3, os teores de Mg^{2+} estiveram dentro da faixa de 0,16 a 0,45 $cmol_c\ dm^{-3}$, sendo classificado como baixo; enquanto os teores desse elemento para os tratamentos T4 e T5 receberam a classificação média (0,46 a 0,90 $cmol_c\ dm^{-3}$), conforme proposto por Ribeiro et al. (1999).

Para a acidez do solo (H+Al), considerando a classe de interpretação de fertilidade do solo, os teores desse atributo se apresentam em quantidade muito baixa ($\leq$ 1,00 $cmol_c\ dm^{-3}$), de acordo com Ribeiro et al. (1999).

Como destacado por Novais et al. (2007), para valores de pH maiores que 5,5, o solo não apresenta a presença de acidez. Devido a isso, tornam-se praticamente nulas as concentrações da acidez trocável (Al^{3+}) e, consequentemente, da acidez potencial (H+Al). No solo em estudo, o H+Al apresentou média entre os tratamentos igual a 0,02 $cmol_c\ dm^{-3}$.

A capacidade de troca catiônica (CTC) representa a quantidade de cargas negativas que estão presentes no solo, neutralizadas pelas cargas positivas (cátions) presentes, sendo obtida pela soma de bases (SB) somada com a acidez potencial (H+Al), podendo ser, também, denominada de CTC a pH 7,0 (Novais et al., 2007).

De acordo com a CFSEMG (Ribeiro et al., 1999), a CTC do solo estudado pode ser classificada como muito baixa ($\leq$ 1,60 $cmol_c\ dm^{-3}$) para o tratamento T1 e como baixa (1,61 - 4,30 $cmol_c\ dm^{-3}$) para os demais tratamentos. Solos de baixa CTC apresentam dificuldades na retenção de cátions, podendo resultar em menores rendimentos da cultura.

A PST do solo sofreu efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. Ainda, houve efeito significativo a um nível de 1% de probabilidade para os contrastes ortogonais C1 e C2, indicando, assim, diferença entre o tratamento T5 quando comparado aos demais tratamentos e entre o tratamento T4 quando comparado aos tratamentos T1, T2 e T3.

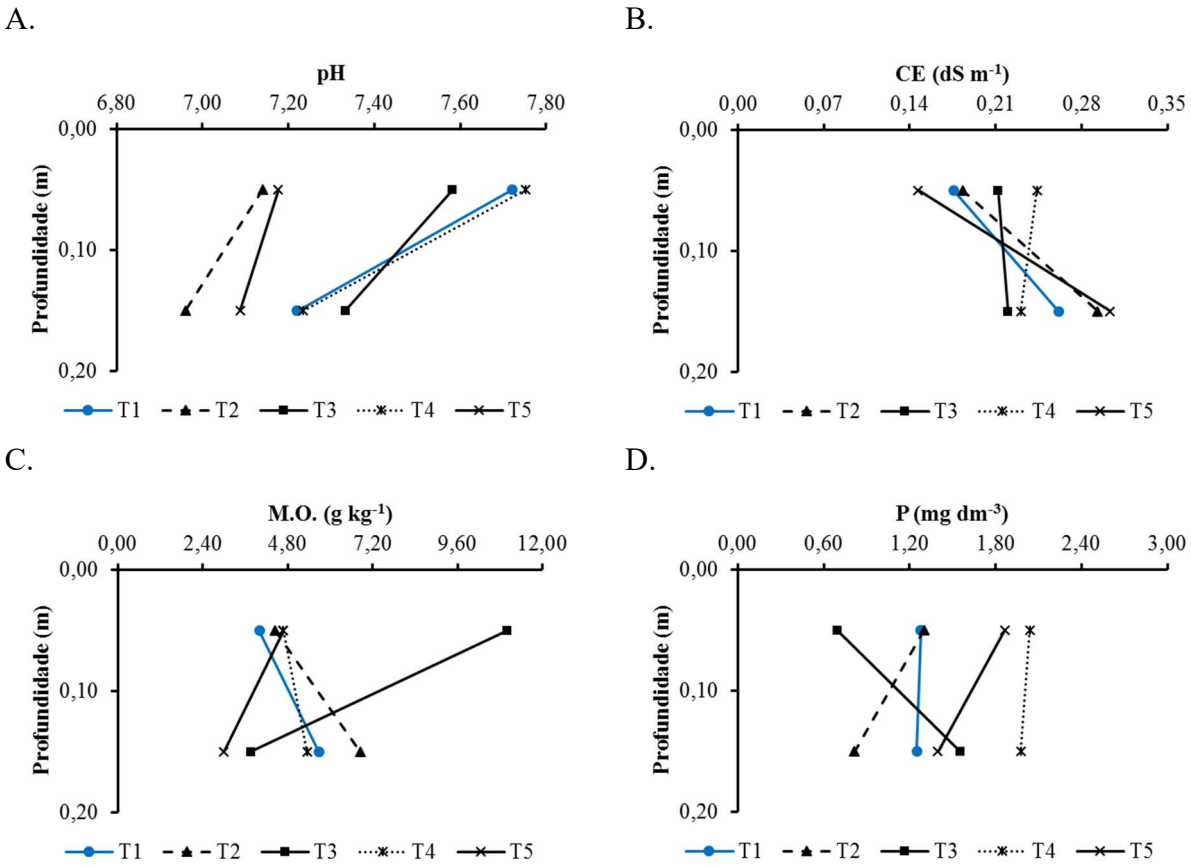
Conforme alguns critérios utilizados para a classificação de solos afetados por sais (Richards, 1954), o solo em estudo pode ser considerado como sódico. Solos sódicos apresentam PST $\geq$ 15%, CE $\leq$ 4 dS m^{-1}, com um pH, geralmente, entre 8,5 e 10, resultante da hidrólise do Na^+ do complexo de troca ou da formação de Na_2CO_3. No entanto, o solo utilizado no experimento apresentou valor médio de pH igual a 7,32.

5.2.1 Potencial hidrogeniônico (pH), condutividade elétrica do extrato de saturação do solo (CEes), matéria orgânica (MO) e fósforo (P) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

A Figura 13 apresenta os valores de pH, CEes, MO e P, ao final do experimento, nas profundidades de 0,0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m. Observou-se um decréscimo dos valores de pH

(aumento da acidez) para todos os tratamentos, com T1 e T4 apresentando redução considerável ao longo do perfil do solo. O valor mais elevado de pH foi verificado para o tratamento T4, na camada superficial (0,0 – 0,10 m); enquanto, na camada de 0,10 – 0,20 m, o tratamento T3 apresentou maior valor (Figura 13A).

Resultado semelhante foi obtido por Costa (2018), após um ciclo de cultivo do girassol com água produzida tratada diluída, em que ocorreu um decréscimo do pH ao longo do perfil do solo para todos os tratamentos testados. O tratamento T4 (25% de água subterrânea e 75% de água produzida tratada) apresentou maior valor de pH na camada mais superficial do solo (0,0 a 0,10 m); enquanto que, na camada de 0,10 a 0,20 m, o maior valor foi verificado para o tratamento T3 (50% de água subterrânea e 50% de água produzida tratada).



Nota: T1 – somente água subterrânea (AS); T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP); T3 – 50% de AS e 50% de AP; T4 – 25% de AS e 75% de AP e T5 – 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 13. Valores de pH (A), CE_{es} (B), MO (C) e P (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados

Analisando a Figura 13B, com relação a CEes, constatou-se um acréscimo da camada mais superficial até a camada mais profunda em todos os tratamentos, exceto para o T4, em que foi observado um decréscimo. Ao longo do perfil do solo, notou-se que o T5 foi o tratamento que

apresentou a maior discrepância entre os valores da camada superficial e da camada mais profunda. A elevação da CEes nas camadas mais profundas pode estar associada à solubilização dos sais da camada superior e posterior lixiviação às camadas inferiores do solo, onde se acumulam (Silva et al., 2012).

Os resultados apresentados diferem dos encontrados por Costa (2018) e Crisóstomo et al. (2016), onde foi observado que houve um decréscimo da CEes da camada superficial para a camada mais profunda, podendo estar associado a maior concentração de sais dissolvidos na camada mais superficial do solo.

No que se refere ao aporte da MO do solo estudado, observou-se na Figura 13C que houve comportamentos distintos entre os tratamentos, verificando um incremento para o T1, T2 e T4 da camada mais superficial para a mais profunda, sendo que esse último apresentou praticamente os mesmos teores nas duas camadas. Já os tratamentos T3 e T5 apresentaram um declínio nos valores ao longo perfil do solo.

Analisando os tratamentos T1, T2 e T4, verificou-se que a diminuição do pH proporcionou um aumento no teor de MO do solo. Isso pode ser explicado pelo fato da maioria dos microrganismos do solo apresentarem pH ótimo de metabolismo próximo da neutralidade, conforme Lopes (1977), pois a acidez do meio inibe as atividades dos microrganismos levando aos maiores teores de matéria orgânica.

Notou-se, na Figura 13D, que os valores de P também apresentaram comportamentos divergentes, em que o tratamento T4 apresentou maiores teores do elemento nas duas profundidades. Apenas o tratamento T3 apresentou aumento de P em profundidade.

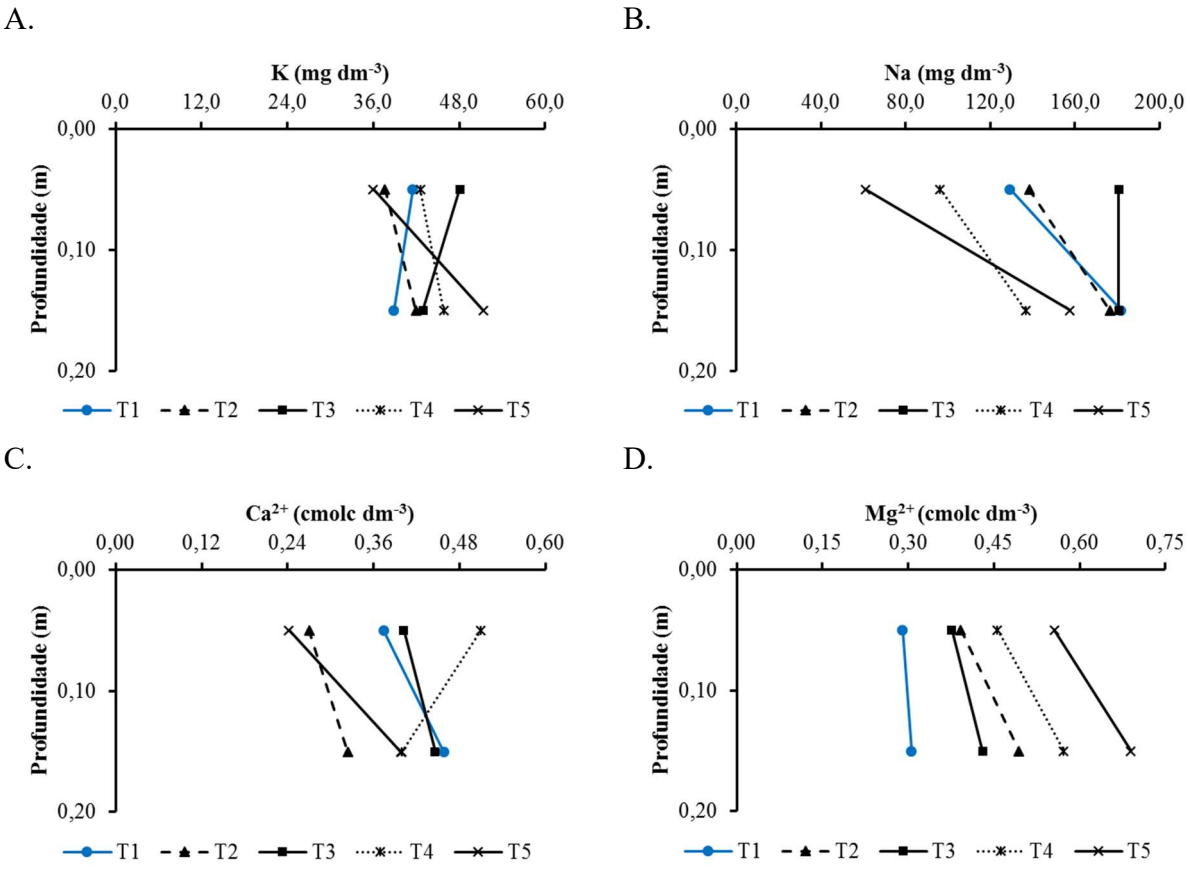
O solo em estudo foi classificado como arenoso e franco arenoso nas camadas de 0 – 0,10 e 0,10 – 0,20 m, respectivamente, conforme a Tabela 6. Em todos os tratamentos, exceto no T3, a disponibilidade de P foi maior na camada superficial, onde os valores de areia são maiores. Solos com elevado teor de argila, exercem predominantemente função reducionista da disponibilidade de P devido a processos de adsorção e fixação, enquanto aqueles com elevado teor de areia, promovem aumento da disponibilidade deste elemento (Novais & Smyth, 1999).

5.2.2 Potássio (K), sódio (Na), cálcio (Ca) e magnésio (Mg) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Os teores de K, Na, Ca e Mg nas camadas de 0,0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, ao final do experimento, estão evidenciados na Figura 14. Observou-se que o tratamento T5 apresentou a menor concentração de K na camada mais superficial do solo, sendo que em profundidade

obteve o maior acúmulo desse elemento. Os demais tratamentos não apresentaram variações consideráveis ao longo do perfil do solo (Figura 14A).

Vale ressaltar que, apesar do K ser um dos três nutrientes mais requeridos em quantidade pelas plantas, deve-se ter cuidado, pois, em determinadas condições e em conjunto com o sódio, podem causar dispersão das argilas, e consequentemente, desestruturação do solo (Matos, 2012).



Nota: T1 – somente água subterrânea (AS); T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP); T3 – 50% de AS e 50% de AP; T4 – 25% de AS e 75% de AP e T5 – 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 14. Valores de K (A), Na (B), Ca (C) e Mg (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados

Resultado contrário foi observado por Weber et al. (2017), ao avaliar os efeitos da irrigação com água produzida filtrada e tratada por osmose reversa sobre a concentração de alguns nutrientes no solo. Esses autores constataram, para o terceiro ciclo da cultura do girassol, que o teor de K foi maior na camada mais superficial, decrescendo ao longo do perfil do solo.

Na Figura 14B observa-se que ocorreu aumento dos teores de Na na camada mais inferior do solo, devido, provavelmente, a lixiviação desse elemento. Entretanto, o tratamento T3

permaneceu praticamente estável, sendo esse o tratamento que apresentou um maior acúmulo de Na na camada mais superficial.

Os resultados encontrados não se assemelham aos descritos por Costa (2018), no qual, ao proceder com a aplicação de água produzida tratada diluída em Argissolo para o cultivo de girassol, constatou acúmulo de sódio na camada mais superficial, exceto para o tratamento testemunha. Já em trabalho realizado por Weber et al. (2017), observou-se que com a aplicação de água produzida filtrada, o Na acumulou-se em camadas abaixo da zona radicular (0,40 a 0,60 e 0,60 a 0,80 m).

A elevada concentração de sódio na rizosfera provoca a redução da permeabilidade das raízes à água, tendo como consequência direta o estresse hídrico. Isso provoca o fechamento dos estômatos para reduzir as perdas de água por transpiração, reduzindo consequentemente a taxa fotossintética, afetando assim o desenvolvimento das plantas ao longo do seu ciclo (Taiz et al., 2017).

Analisando as concentrações de Ca nas camadas (Figura 14C), constatou-se que houve um incremento em profundidade, exceto para o tratamento T4, no qual observou-se um declínio. Entretanto, esse tratamento apresentou o maior valor de Ca na camada mais superficial do solo.

Esse resultado difere, em parte, ao observado por Sousa et al. (2016), em que constataram um decréscimo de Ca das camadas superficiais para as camadas mais profundas, em solo irrigado com água produzida filtrada e tratada por osmose reversa. Além disso, observou-se que esses tratamentos apresentaram maiores teores desse elemento em todas as camadas, quando comparados à testemunha.

As concentrações de Mg para todos os tratamentos, ao logo do perfil do solo, apresentaram comportamento semelhante, visto que ocorreu um acúmulo desse elemento em profundidade, com um discreto aumento do tratamento testemunha, conforme visualizado na Figura 14D. Os menores e maiores valores de Mg foram observados para os tratamentos T1 e T5, respectivamente, nas duas camadas analisadas. Isso pode ser explicado devido a água produzida tratada utilizada no experimento apresentar um maior teor de Mg, quando comparada à água subterrânea.

O maior acúmulo de Ca e Mg em profundidade pode ser devido a textura arenosa do solo em estudo, conforme a Tabela 6, o que reduz a capacidade de adsorção desses cátions ao solo, favorecendo sua lixiviação.

5.2.3 Acidez potencial (H + Al), capacidade de troca catiônica (CTC) e porcentagem de sódio trocável (PST) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Para a acidez potencial ocorreram comportamentos distintos dos teores, ao longo do perfil do solo, nos tratamentos T1 ao T5 (Figura 15A). Constatou-se aumento nos valores de H + Al em profundidade para os tratamentos T3 e T4 e redução para os demais. O tratamento T5 apresentou o maior valor em superfície. Entretanto, nota-se que os valores de H + Al são muito baixos em ambas as camadas, visto que o pH do solo em estudo é maior que 5,5, não apresentando a presença de acidez.

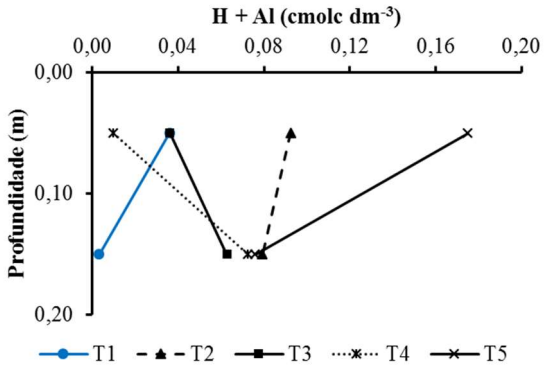
Houve incremento da CTC na camada mais profunda do solo para todos os tratamentos avaliados, sendo constatado que a maior variação ao longo do perfil do solo ocorreu para o T5 que apresentou o menor valor em superfície e o maior valor em profundidade quando comparados os tratamentos (Figura 15B).

O comportamento da CTC foi semelhante ao dos cátions Ca e Mg no perfil do solo, visto que essa variável é dependente, em parte, destes elementos, indicando que o solo armazenou maior quantidade de cátions trocáveis em profundidade, ou seja, ocorreu lixiviação.

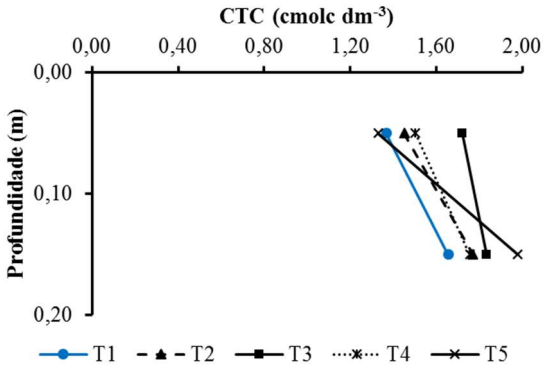
Devido ao fato de a PST ser diretamente proporcional à concentração de Na, constatou-se, na Figura 15C, comportamento semelhante entre essas duas variáveis. Da mesma forma que para o Na, o tratamento T3 apresentou maior valor de PST em superfície, enquanto o menor valor foi verificado para o tratamento T5.

Resultado semelhante foi encontrado por Miranda et al. (2016) na irrigação da mamoneira; os autores atribuíram a elevação da PST à maior concentração salina da água produzida filtrada e, principalmente, ao maior teor de sódio trocável em relação aos demais tipos de água.

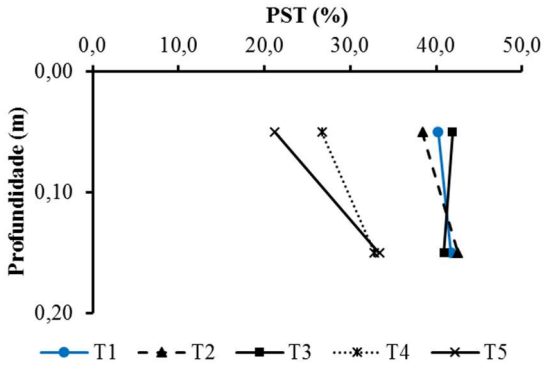
A.



B.



C.



Nota: T1 – somente água subterrânea (AS); T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP); T3 – 50% de AS e 50% de AP; T4 – 25% de AS e 75% de AP e T5 – 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 15. Valores de H + Al (A), CTC (B) e PST (C) do solo, em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados

5.3 Micronutrientes e metais pesados no solo após irrigação com água produzida tratada diluída em água subterrânea

A Tabela 11 apresenta os valores médios, coeficientes de variação (%), erros-padrão e probabilidades utilizando o teste de Tukey, como também os contrastes ortogonais de médias

dos tratamentos aplicados de acordo com as variáveis: ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu), zinco (Zn), cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb).

De acordo com a classe de interpretação da disponibilidade para os micronutrientes elaborada pela CFSEMG (Ribeiro et al., 1999), o teor médio de ferro no solo em estudo, para todos os tratamentos, foi classificado como muito baixo (≤ 8 mg dm^{-3}). A Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009) não apresenta valores de prevenção para a contaminação por Fe.

O baixo teor de Fe pode estar relacionado ao elevado pH do solo, pois a maior disponibilidade desse nutriente ocorre na faixa de pH 4,0 a 6,0. A deficiência de Fe também pode ser causada por desequilíbrio em relação a outros micronutrientes, tais como: Mn e Cu (Novais et al., 2007).

No que se refere aos teores de Mn, a média entre os tratamentos foi igual a 0,42 mg dm^{-3}. Dessa forma, conforme Ribeiro et al. (1999), o teor médio de Mn no solo utilizado foi classificado como muito baixo (≤ 2 mg dm^{-3}). A Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009) não apresenta valores de prevenção da contaminação do solo por Mn.

De acordo com Novais et al., (2007), a maior disponibilidade de Mn ocorre na faixa de pH 5,0 a 6,5. Além disso, a deficiência de Mn acima de pH 6,5 é muito menor em solos com teores apreciáveis de matéria orgânica (MO) que em solo com baixo teor de MO. Entretanto, o solo utilizado no experimento apresentou pH acima da faixa recomentada e baixo teor de MO, o que pode explicar os baixos valores para esse elemento.

Do ponto de vista agronômico, com relação à disponibilidade no solo, o teor de Cu foi classificado como muito baixo (≤ 0,3 mg dm^{-3}), segundo Ribeiro et al. (1999). Enquanto do ponto de vista ambiental, todos os teores de Cu foram inferiores ao limite de 60 mg dm^{-3} de peso seco, estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009) para prevenção da contaminação dos solos por resíduos e efluentes.

Preston et al. (2014) determinaram valores orientadores de referência de qualidade (VRQs) para metais pesados em solos do Estado do Rio Grande do Norte. Constatou-se que o teor médio de Cu do solo em estudo foi menor que 13,69 mg dm^{-3}, sendo esse o limite estabelecido pelos referidos autores para esse atributo.

Tabela 11. Atributos químicos do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Tratamentos	Atributos químicos do solo (micronutrientes e metais pesados)							
	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
	mg dm^{-3}							
T1	2,43	0,45	0,002	0,20	0,017a	0,003	0,0004	0,06a
T2	2,45	0,39	0,002	0,21	0,019ab	0,003	0,0006	0,05a
T3	2,50	0,40	0,002	0,20	0,020ab	0,004	0,0004	0,11ab
T4	2,62	0,44	0,002	0,20	0,018a	0,003	0,0004	0,10a
T5	2,55	0,40	0,001	0,21	0,029b	0,006	0,0008	0,27b
Média	2,51	0,42	0,002	0,20	0,021	0,004	0,0005	0,12
CV (%)	9,00	15,95	146,20	10,87	26,36	124,93	88,13	73,44
Erro-Padrão	0,10	0,03	0,001	0,01	0,002	0,002	0,0002	0,04
Probabilidade	NS	NS	NS	NS	0,02*	NS	NS	0,01**
Probabilidade dos contrastes (decimal)								
Contraste $C_{1:\ T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	NS	NS	0,01**	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{2:\ T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{3:\ T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{4:\ T2\ Vs\ T1}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: T1 – Somente água de subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; Fe – Ferro; Mn – manganês, Cu – cobre, Zn – zinco, Cr – cromo, Ni – níquel, Cd – cádmio e Pb – chumbo; $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Com relação a disponibilidade de Zn no solo, seu teor foi classificado como muito baixo (≤ 0,4 mg dm^{-3}), conforme Ribeiro et al. (1999). As concentrações médias de Zn ficaram abaixo do VQR de 23,85 mg dm^{-3}, estabelecido por Preston et al. (2014) para esse elemento em solos do Rio Grande do Norte. Também foram inferiores ao limite de 300 mg dm^{-3} considerado pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009) para prevenção da contaminação dos solos por metais.

Solos derivados de rochas ígneas básicas são mais ricos em Zn, e os solos derivados de rochas sedimentares, arenito, os mais pobres (Novais et al., 2007). O solo utilizado no experimento provém de uma área com formações geológicas em que predominam os calcários da formação Jandaíra, que compreendem calcarenitos e calcilutitos bioclásticos e os arenitos da Formação Açu (Angelim et al., 2006).

Para os teores de Cr houve significância a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. O tratamento T5 apresentou a maior média entre os tratamentos, sendo essa igual a 0,029 mg dm^{-3}. Ainda, houve efeito significativo no contraste ortogonal C1 ao nível de 1% de probabilidade, indicando que o teor de Cr do tratamento que recebeu somente água produzida tratada, T5, diferiu estatisticamente dos demais tratamentos.

Segundo a Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009), as concentrações médias de Cr encontradas no solo em estudo, após a aplicação das diluições de água produzida tratada, não são alarmantes, pois são inferiores ao limite de 75 mg dm^{-3} considerado para prevenção de toxicidade. Levando em consideração os VRQs determinados para o Estado do Rio Grande do Norte, o teor de Cr também está abaixo do limite de 30,94 mg dm^{-3}, estabelecido por Preston et al. (2014).

Os teores médios de Ni no solo estudado, após a aplicação das diluições de água produzida tratada, foram inferiores ao limite de 30 mg dm^{-3} estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil, 2009) para prevenção de toxidez. Esses teores também foram inferiores ao VRQ estabelecido para o Ni de 19,84 mg dm^{-3}, para solos do Rio Grande do Norte (Preston et al., 2014).

As baixas concentrações de Ni podem estar relacionadas ao pH alcalino do solo, que contribui para a imobilização desse metal (Koh et al., 2004). Embora existam poucas informações sobre os fatores que afetam a disponibilidade do Ni, pode-se supor que os fatores que afetam a disponibilidade dos outros metais afetam também a disponibilidade desse elemento (Novais et al., 2007).

Comparando com o limite estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil 2009), constatou-se que as concentrações de Cd encontradas no solo estudado não são preocupantes, pois foram inferiores ao valor de 1,3 mg dm^{-3} considerado para prevenção de

toxidez. Os teores encontrados também estão abaixo do VRQ de 0,1 mg dm^{-3} estabelecido para esse elemento em solos do Rio Grande do Norte (Preston et al., 2014).

Segundo Pierangeli et al. (2007), a retenção de Cd no solo ocorre, na sua maior parte, por meio das forças eletrostáticas das partículas negativamente carregadas, o que a torna bastante dependente da CTC do solo. Dessa forma, a baixa retenção de Cd no solo em estudo pode estar associada à baixa porcentagem da fração argila, responsável pelos sítios de troca, ocorrendo baixa CTC, concordando com Souza et al. (2006).

As concentrações de Pb apresentaram diferença estatística ao nível de 1% de probabilidade com relação às diluições de água produzida tratada. Ainda, foi constatado efeito significativo para o contraste ortogonal C1, indicando que o teor de Pb do tratamento T5 diferiu dos demais.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 420/2009 (Brasil 2009), as concentrações de Pb foram inferiores ao limite de 72 mg dm^{-3} estabelecido para prevenção da toxidez. Os valores encontrados para esse elemento também foram inferiores ao VRQ de 16,18 mg dm^{-3} considerado para solos do Rio Grande do Norte.

Lima & Meurer (2013) salientam que o Pb tem grande afinidade de ser acumulado na MO e que sua absorção pelas plantas vai depender do teor do metal e da forma que se encontra no solo. Porém, é um metal que pode ser absorvido tanto em baixas como em altas concentrações, apesar de ser o elemento menos móvel no solo.

5.3.1 Ferro (Fe), manganês (Mn), cobre (Cu) e zinco (Zn) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

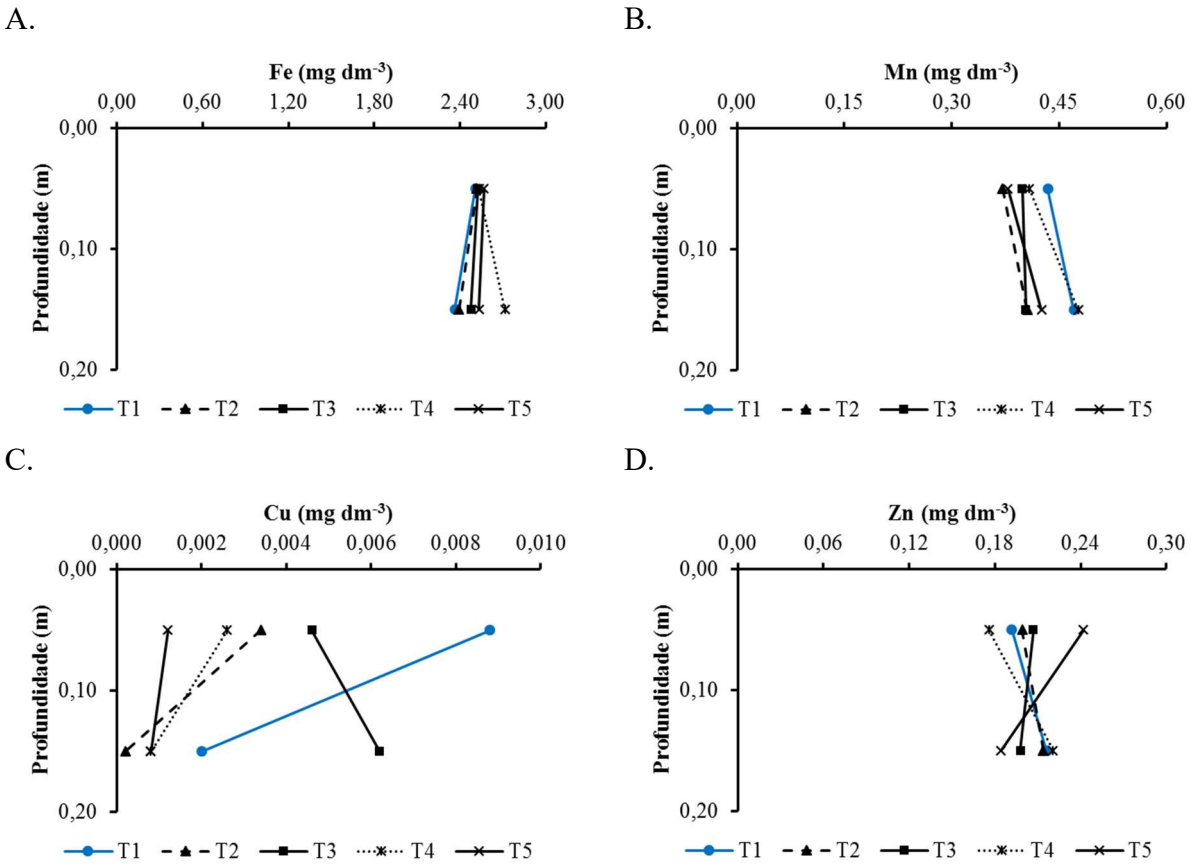
Na Figura 16 estão apresentados os valores médios de Fe, Mn, Cu e Zn ao final do experimento, nas camadas de 0,0 a 0,10 e 0,10 a 0,20 m, de um Argissolo Vermelho Distrófico Típico cultivado com palma forrageira, irrigada com diluições de água produzida tratada.

Houve pequenas variações nos teores de Fe ao longo do perfil do solo, sendo os maiores valores encontrados na camada de 0,0 a 0,10 m. O tratamento T4 foi o único que apresentou um incremento desse elemento em profundidade (Figura 16A).

Esses resultados diferem dos apresentados por Costa (2018), em que as concentrações de Fe do solo irrigado com água produzida tratada aumentaram com a profundidade, exceto para o tratamento testemunha. De modo semelhante, Weber et al. (2017) evidenciaram teores de Fe apenas nas camadas mais profundas do solo irrigado com água produzida filtrada, tratada por osmose reversa e água subterrânea.

Com relação às concentrações de Mn no solo estudado, conforme a Figura 16B, houve uma leve tendência de aumento em profundidade para todos os tratamentos, exceto para o tratamento T3 que permaneceu praticamente constante. O maior valor na camada superficial foi observado para o tratamento T1 (somente água subterrânea).

O Mn é mais móvel no solo do que o Fe e, frequentemente, distribui-se no perfil do solo de forma diferente deste último elemento. Considerando que as substâncias húmicas reduzem o Mn facilmente e que o elemento se oxida com dificuldade em meio ácido, tem-se, nessas condições, maior migração do elemento no perfil do solo (Novais et al., 2007). Os principais fatores que determinam a disponibilidade de Mn são pH, condições de oxirredução, teores de matéria orgânica e equilíbrio com outros cátions, principalmente Fe, Ca e Mg (Reisenauer, 1988).



Nota: T1 – somente água subterrânea (AS); T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP); T3 – 50% de AS e 50% de AP; T4 – 25% de AS e 75% de AP e T5 – 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Figura 16. Valores de Fe (A), Mn (B), Cu (C) e Zn (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados

Weber et al. (2017), observaram que houve redução na concentração de Mn ao longo do perfil do solo para os três ciclos de produção de girassol irrigado com água produzida, independente do tratamento utilizado, e com água subterrânea (testemunha).

Analisando a Figura 16C, observa-se que houve um decréscimo dos teores de Cu com a profundidade, exceto para o tratamento T3. O maior valor desse elemento foi constatado para o tratamento T1 na camada mais superficial do solo. Este fato pode estar relacionado ao pH do extrato de saturação do solo, que quando apresentam valores elevados indisponibilizam este nutriente no complexo sortivo do solo.

Resultado semelhante foi observado no trabalho de Costa (2018) em que, ao aplicar diluições de água produzida tratada na irrigação do girassol, averiguou maior concentração de Cu na camada mais superficial do solo para todos os tratamentos, tendo o T1 (somente água subterrânea) apresentado os maiores valores.

Verificou-se, na Figura 16D, que houve comportamentos distintos entre os tratamentos com relação aos teores de Zn ao longo do perfil do solo, sendo observado um incremento em profundidade para os tratamentos T1, T2 e T4 e uma redução para T3 e T5.

Em regiões áridas e semiáridas, a deficiência de Zn nas plantas pode ocorrer nas camadas superiores do solo, que são mais secas em comparação com as camadas mais profundas do solo, proibindo o transporte desse elemento para as raízes das plantas por difusão (Cakmak et al., 1996).

As principais causas da deficiência de Zn nas culturas são principalmente relacionadas ao solo: baixa disponibilidade de Zn (pH alto, solos calcários e sódicos), baixo teor de Zn total no solo, perda de matéria orgânica do solo, presença de nitrogênio, sódio, cálcio, magnésio e fosfatos, exploração restrita das raízes devido a compactação do solo e etc (Alloway, 2008; Alloway, 2009).

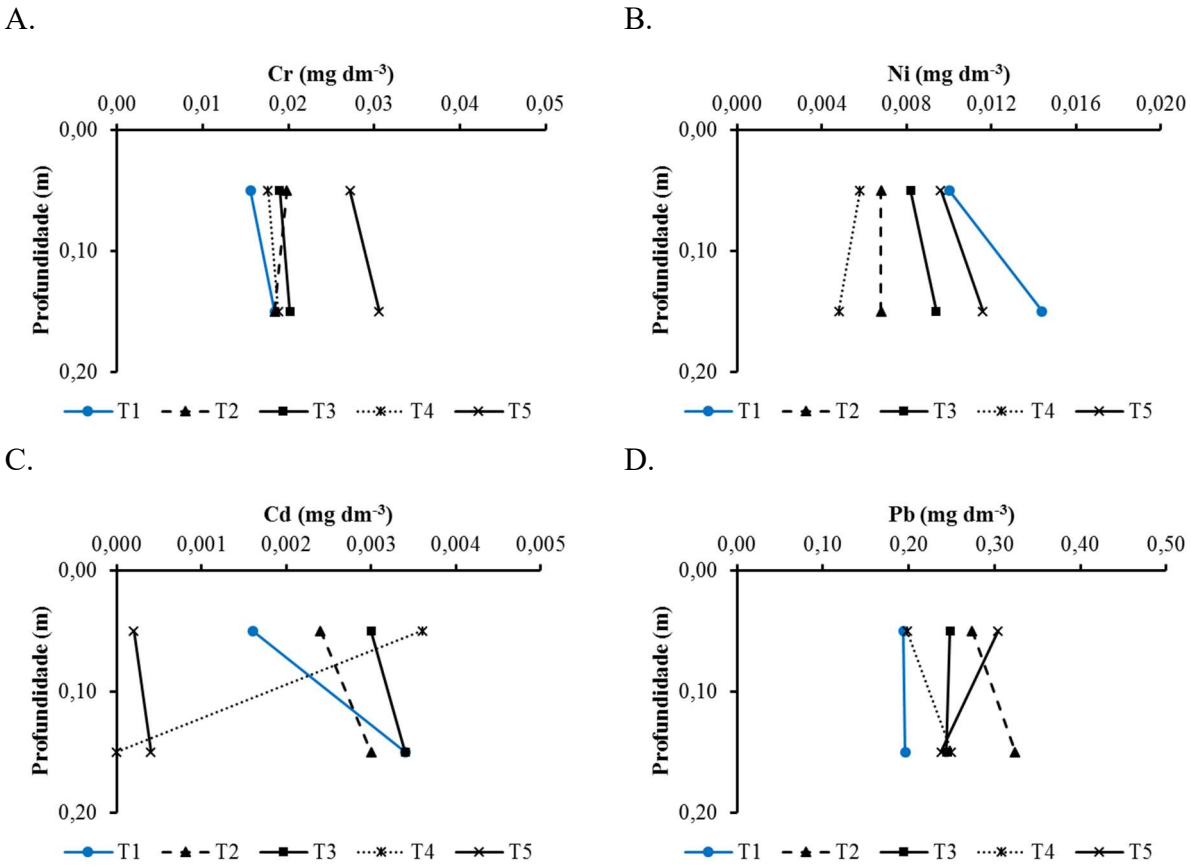
Ao avaliar a irrigação do girassol com água produzida filtrada e tratada por osmose reversa, Weber et al. (2017) constataram que a interação entre os tipos de água e os ciclos de produção da cultura influenciaram o conteúdo de Zn da primeira camada (0,0 a 0,20 m) do solo.

5.3.2 Cromo (Cr), níquel (Ni), cádmio (Cd) e chumbo (Pb) ao longo do perfil do solo irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Observa-se, na Figura 17A, que para todos os tratamentos as concentrações de Cr mantiveram-se praticamente inalteradas nas duas profundidades analisadas (0,0 a 0,10 e 0,10 a 0,20), sendo que o tratamento T5 apresentou os maiores valores em ambas.

Com relação aos teores de Ni, notou-se que os maiores valores foram observados para o tratamento T1, enquanto os menores valores foram verificados para o tratamento T4, nas duas profundidades avaliadas (Figura 17B). Esse resultado assemelha-se, em parte, ao encontrado por Costa (2018), em que constatou um maior teor de Ni na camada mais superficial do solo irrigado somente com água subterrânea (testemunha).

Os maiores valores de Cd foram constatados na profundidade de 0,10 a 0,20 m, exceto para o tratamento T4 que apresentou maior valor na camada mais superficial do solo, com redução brusca dos seus teores em profundidade, conforme visualizado na Figura 17C. De acordo com Cunha et al. (2008), o Cd é um elemento altamente móvel no solo, encontrado em maior parte na fase trocável.



Nota: T1 – somente água subterrânea (AS); T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP); T3 – 50% de AS e 50% de AP; T4 – 25% de AS e 75% de AP e T5 – 100% de AP.
Fonte: Acervo da pesquisadora (2018).

Figura 17. Valores de Cr (A), Ni (B), Cd (C) e Pb (D) do solo em função das profundidades de coleta, para os diferentes tratamentos aplicados

Em relação aos teores de Pb, constatou-se que as maiores concentrações foram observadas para os tratamentos que receberam água produzida tratada. Ao longo do perfil do solo, observa-se que os tratamentos T1 e T3 mantiveram-se praticamente constantes, enquanto para

os tratamentos T2 e T4 houve um incremento deste elemento em profundidade e tendência de redução no tratamento T5 (Figura 17D).

Esse resultado assemelha-se, em parte, ao encontrado por Costa (2018) que constatou maiores teores de Pb nos tratamentos que receberam água produzida tratada, no entanto, os valores tendem a diminuir ao longo do perfil do solo.

Sousa et al. (2017), constataram que as maiores concentrações de Cr, Ni e Pb foram verificadas na camada mais superficial, enquanto as concentrações do elemento Cd foram maiores nas camadas mais profundas do solo quando irrigado com água produzida tratada por filtração.

De maneira geral, as características físico-químicas do solo irrigado com diferentes diluições de água produzida tratada não foram impeditivas ao cultivo da palma forrageira. Entretanto, expressões máximas do potencial da cultura podem não ser atingidas devido a baixa CTC (1,61 – 4,30 $cmol_c\ dm^{-3}$) do solo e até muito baixa (≤ 1,60 $cmol_c\ dm^{-3}$) para o tratamento T1, bem como ao pH fora da faixa ideal (5,5 - 6,5) para um bom desenvolvimento da cultura.

5.4 Estado nutricional da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

5.4.1 Acúmulo de nutrientes nos cladódios

A Tabela 12 apresenta os valores médios da composição nutricional dos cladódios de palma forrageira avaliada aos 240 DAP, assim como os coeficientes de variação, erros-padrão e probabilidades obtidos com o teste de Tukey, além dos contrastes ortogonais de médias dos tratamentos aplicados.

Observa-se que o teor médio de K nos cladódios da palma foi igual a 68,77 g kg^{-1}, sendo superior à faixa normal de 15 a 30 g kg^{-1} estudada para forrageiras (Werner et al., 1997); entretanto, segundo Novais et al. (2007), são raros os sintomas causados pelo excesso de K.

Esse resultado difere do encontrado por Lemos (2016), ao analisar os teores de nutrientes exportados de palma forrageira fertirrigada com esgoto doméstico tratado, em que obteve conteúdo médio de K exportado via cladódio igual a 22,99 g kg^{-1} na matéria seca. Já Sousa et al. (2016), avaliando os aspectos nutricionais da cultura do girassol irrigado com água produzida tratada por filtração e por osmose reversa, obtiveram teores médios de K na parte aérea iguais a 43,47 e 40,40 g kg^{-1}, respectivamente, para o primeiro ciclo da cultura.

Tabela 12. Estado nutricional dos cladódios de palma forrageira avaliados aos 240 dias após o plantio

Tratamentos	Acúmulo de nutrientes nos cladódios											
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
	.....g kg^{-1}.....			.....mg kg^{-1}.....								
T1	69,67	31,72	21,55	423,14b	87,122	1057,50	8,43	75,17	0,04a	0,13	0,018a	0,43ab
T2	69,17	44,96	24,25	423,14b	127,58	1045,50	8,45	110,79	0,04ab	0,17	0,030a	0,61b
T3	62,10	45,19	21,67	431,44b	126,92	928,98	8,48	68,77	0,04a	0,15	0,018a	0,49ab
T4	78,76	36,49	19,94	431,44b	133,78	798,50	8,75	63,30	0,08b	0,16	0,022a	0,34a
T5	64,12	41,10	19,01	298,69a	125,66	871,48	8,85	60,97	0,06ab	0,15	0,038a	0,41ab
Média	68,77	39,89	21,28	401,57	120,21	940,39	8,59	75,80	0,05	0,15	0,025	0,45
CV (%)	23,67	26,49	18,39	13,01	13,07	33,91	20,75	39,80	33,46	25,74	41,33	24,56
Erro-Padrão	7,28	4,73	1,75	23,36	7,03	142,62	0,80	13,49	0,01	0,02	0,005	0,05
Probabilidade	NS	NS	NS	0,01**	0,01**	NS	NS	NS	0,01**	NS	0,03*	0,02*
Probabilidade dos contrastes (decimal)												
Contraste $C_{1:\ T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	NS	0,01**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**	NS
Contraste $C_{2:\ T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	NS	NS	NS	0,01*	NS	NS	NS	0,01**	NS	NS	0,01*
Contraste $C_{3:\ T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	0,04*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{4:\ T2\ Vs\ T1}$	NS	NS	NS	NS	0,01**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,02*

Nota: T1 – Somente água subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Na – sódio; Fe – ferro; Mn – manganês; Cu – cobre; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio e Pb – chumbo. $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Geralmente, os teores de K nas plantas variam entre 6 e 50 g kg^{-1} de matéria seca da planta, considerando valores entre 10 e 30 g kg^{-1} como adequados para um crescimento normal. Plantas deficientes apresentam teores foliares menores do que 8 g kg^{-1}, enquanto, acima de 50 g kg^{-1}, podem-se observar sintomas de toxidez (Malavolta et al., 1997; Furlani, 2004).

O menor acúmulo de Ca nos cladódios de palma forrageira foi verificado para o tratamento T1 (31,72 g kg^{-1}), o que pode ser devido a menor concentração desse elemento na água subterrânea utilizada para irrigação, conforme a Tabela 9.

O Ca influi, indiretamente, no rendimento das culturas, ao melhorar as condições de crescimento das raízes, bem como por estimular a atividade microbiana, além de ajudar a reduzir o NO_3^- na planta. Concentrações de Ca entre 10 e 50 g kg^{-1} são consideradas adequadas para um crescimento normal das plantas (Malavolta et al., 1997; Furlani, 2004). No presente estudo, observa-se que o teor médio desse nutriente nos cladódios da palma encontra-se dentro da faixa recomendada pelos autores, sendo igual a 39,89 g kg^{-1}.

Concentrações menores foram encontradas por Costa (2018), ao analisar a composição mineral do tecido foliar de girassol (*Heliantus annus*) irrigado com água produzida tratada diluída em água subterrânea, obtendo valor médio de Ca igual a 17,80 g kg^{-1}; e no trabalho conduzido por Sousa et al. (2016) utilizando água produzida tratada por filtração e por osmose reversa na irrigação do girassol, em que os teores médios de Ca encontrados foram iguais a 21,89 e 19,53 g kg^{-1}, respectivamente, ao final do primeiro ciclo da cultura.

O teor médio de Mg nos cladódios da palma forrageira foi de 21,28 g kg^{-1}, sendo superior a faixa recomenda de 3 a 5 g kg^{-1}, adequada para um crescimento normal das plantas, conforme Malavolta et al. (1997) e Furlani (2004). Praticamente não existem relatos sobre a toxidez de Mg em plantas.

Analisando a composição nutricional do mandacaru sem espinho irrigado com efluente de laticínios, Costa (2017) encontrou concentração média de Mg, nos cladódios, igual a 38,59 g kg^{-1}. Já Costa (2018), ao estudar a composição nutricional do girassol irrigado com água produzida tratada, obteve valor médio para o Mg no tecido foliar igual a 2,01 g kg^{-1}. Comparando esses valores, percebe-se que o acúmulo de Mg foi relativamente maior nas partes aéreas de espécies forrageiras (palma e mandacaru) do que em oleaginosas (girassol).

Houve significância estatística para o Na ao nível de 1% de probabilidade com relação aos tratamentos utilizados. Além disso, houve efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade para o contraste ortogonal C1, indicando, assim, que o teor de Na do tratamento T5 diferiu dos demais tratamentos.

Conforme Fernandes (2006), a concentração de sódio em tecidos vegetais varia de 13 a 35100 mg kg^{-1}. No presente estudo, o teor médio de Na nos cladódios da palma foi igual a 401,57 mg kg^{-1}.

A água subterrânea utilizada para a irrigação da palma apresentou-se com elevadas concentrações de Na, justificando o fato de que o acúmulo desse elemento nos cladódios das plantas submetidas ao tratamento T1 (somente água subterrânea) foi maior, se comparado aos demais tratamentos, indicando que ocorreu o processo de fitoextração desse elemento pela planta em relação ao solo.

Comportamento semelhante foi observado por Weber et al. (2017), em que os teores de sódio da parte aérea do girassol irrigado com água subterrânea (testemunha), foram maiores do que quando utilizada água produzida tratada por osmose reversa, para o segundo e o terceiro ciclos da cultura.

Com relação ao acúmulo de Fe nos cladódios, houve diferença estatística ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey entre os tratamentos estudados, apresentando média geral igual a 120,21 mg kg^{-1}. Ainda, ocorreu efeito significativo a 5% de probabilidade para os contrastes ortogonais C2 e C3 e a 1% de probabilidade para o contraste C4.

De acordo com Werner et al. (1996), a faixa de suficiência de teores de Fe na parte aérea de plantas forrageiras varia de 50 a 200 mg kg^{-1} para algumas espécies. Dessa forma, os teores médios desse elemento para os tratamentos estudados, encontram-se dentro do intervalo especificado pelos autores.

Lemos (2016) avaliou a extração de nutrientes em palma forrageira fertirrigada com esgoto doméstico tratado, e observou que o teor médio de Fe exportado via cladódios foi de 396,69 mg kg^{-1} na matéria seca. Teores mais elevados de Fe foram encontrados por Sousa et al. (2016) na parte aérea do girassol irrigado com água produzida tratada por filtração e por osmose reversa, apresentando valores médios iguais a 847 e 1443,50 mg kg^{-1}, respectivamente, para o primeiro ciclo da cultura.

Os valores médios de Mn para todos os tratamentos estão acima da faixa de suficiência (40 a 200 mg kg^{-1}) estabelecida por Werner et al. (1996), para os teores desse elemento na parte aérea de algumas espécies forrageiras. Também estão acima da faixa adequada de 20 a 500 mg kg^{-1} de matéria seca, para um crescimento e desenvolvimento normais de planta (Fernandes, 2006).

Lemos (2016) encontrou conteúdo médio de Mn exportado via cladódios igual a 1616,71 mg kg^{-1} de matéria seca), após irrigação da palma forrageira com esgoto doméstico tratado, sendo esse valor superior ao do presente estudo. Valores inferiores foram constatados por

Costa (2018) quando da utilização de água produzida tratada na irrigação do girassol, em que o teor médio de Mn na parte aérea da planta foi de 9,32 mg kg^{-1}.

Considera-se que o Mn é facilmente absorvido pelas plantas, quando ocorre na forma solúvel no solo, existindo uma relação direta entre o teor solúvel do elemento no solo e a concentração na planta. Os sintomas de toxidez são mais visíveis em plantas jovens, manifestando-se por meio de manchas marrons nas folhas (Novais et al., 2007).

Analisando os teores de Cu, foi constatado maior acúmulo desse micronutriente nos cladódios da palma à medida que aumentaram-se as proporções de água produzida tratada, do tratamento T1 ao T5. O teor médio encontrado foi igual a 8,59 mg kg^{-1}, estando esse valor compreendido entre 5 a 30 mg kg^{-1}, sendo essa faixa considerada adequada para um crescimento normal das plantas (Ballabio et al., 2018). Também se encontra dentro da faixa de suficiência (4 a 12 mg kg^{-1}) de teor de Cu adotada para a parte aérea de algumas espécies forrageiras, conforme Werner et al. (1996).

O Cu é um micronutriente essencial para a planta, desempenhando um importante papel no processo biológico e fisiológico, como a fotossíntese, síntese proteica e processos respiratórios (Yruela, 2005). A presença de íons metálicos, como Fe, Mn e Al, podem reduzir a sua disponibilidade para as plantas (Novais et al., 2007).

Lemos (2016) constataram que o conteúdo médio de Cu exportado via cladódios foi de 12,60 mg kg^{-1} na matéria seca da palma forrageira orelha de elefante, irrigada com esgoto doméstico tratado.

O acúmulo de Zn nos cladódios da palma variou de 60,97 a 110,79 mg kg^{-1}. Dessa forma, verifica-se que, para todos os tratamentos, os teores médios de Zn estão fora da faixa de suficiência (20 a 50 mg kg-1) estabelecida por Werner et al. (1996), para a parte aérea de algumas espécies forrageiras.

Conforme Fernandes (2006), o Zn é absorvido pelas plantas tanto por via radicular como foliar, sendo considerado um nutriente altamente móvel, o que pode explicar o elevado acúmulo desse elemento nos cladódios da espécie forrageira em estudo.

O excesso de zinco pode afetar o desenvolvimento das plantas, pois interfere em múltiplas vias, causando redução na fotossíntese, alterando as estruturas e organização celular, além de alterar a atividade das enzimas que participam do metabolismo das plantas (Guo et al., 2007).

No que se refere ao Cr, houve significância estatística ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey, com média geral entre os tratamentos de 0,05 mg kg^{-1}. Analisando os contrastes, pode-se observar que houve significância ao nível de 1% de probabilidade para o contraste ortogonal C2, indicando que o teor de Cr do tratamento T4 diferiu de T3, T2 e T1.

A ocorrência de toxicidade nas plantas é rara, provavelmente devido ao Cr apresentar baixa mobilidade e restrito movimento através da membrana celular (Gauglhofer, 1985). De um modo geral, o acúmulo ocorre em maiores concentrações nas raízes, formando barreiras que diminuem a sua translocação para a parte aérea das plantas (Oliveira et al., 2008; Berilli et al., 2015).

Em relação ao Ni, observou-se um aumento no teor desse elemento nos tratamentos que utilizaram água produzida tratada, quando comparados ao tratamento T1 (somente água subterrânea).

Por muito tempo o Ni foi considerado um metal pesado com características tóxicas para as plantas. Entretanto, atualmente este elemento é considerado essencial às plantas por ser parte constituinte da metaloenzimaurease, sendo diretamente relacionado ao metabolismo do nitrogênio (Marenco & Lopes, 2013).

Nas plantas, o Ni é absorvido como Ni^{2+}, podendo competir com outros cátions divalentes. Os teores desse elemento na matéria seca das plantas variam entre 0,3 e 3,5 mg kg^{-1}, dependendo da parte da planta e da espécie (Malavolta, 2006). No presente estudo, a média geral entre os tratamentos (0,15 mg kg^{-1}) está abaixo da faixa estabelecida pelo referido autor.

Em pesquisa realizada por Costa (2018) também não foram observados efeitos significativos das diluições de água produzida tratada na concentração de Ni do tecido foliar do girassol. Entretanto, quando comparados aos do presente estudo, os teores de Ni foram mais elevados, com média de 9,92 mg kg^{-1}.

Analisando as concentrações de Cd nos cladódios, verificou-se que ocorreu efeito significativo a 5% de probabilidade em relação aos tratamentos aplicados. Pode-se observar um maior acúmulo desse nutriente no tratamento T5, somente água produzida tratada, com valor médio igual a 0,038 mg kg^{-1}. Ainda, houve efeito significativo para o contraste ortogonal C1 ao nível de 1% de probabilidade, indicando que o Cd do tratamento T5 diferiu estatisticamente dos demais tratamentos.

Uma vez absorvido, o Cd tende a exibir alta mobilidade nas plantas; assim, parte da quantidade deste metal que é absorvida pelas raízes é translocada para a parte aérea, atingindo seu aparato fotossintético (Küpper & Andresen, 2016). Concentrações elevadas de Cd podem alterar as relações hídricas das plantas, diminuindo a pressão de turgescência (Benavides et al., 2005), como também afetar as translocações de K, Ca e ácido abscísico em células-guarda, diminuindo, consequentemente, a condutância estomática (Pietrini et al., 2010).

Para o elemento Pb, houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey quando comparados os tratamentos. Além disso, os contrastes ortogonais C2 e C4

foram significativos, indicando que o teor de Pb do tratamento T4 diferiu do T3, T2 e T1, como também a concentração de Pb do tratamento T2 diferiu do T1.

O Pb não é considerado tóxico para a maioria das espécies de plantas até valores entre 5 e 10 mg kg^{-1} de massa seca das plantas, porém, entre 30 e 300 mg kg^{-1} deste elemento, graves efeitos de toxicicidade são detectados (Shikhova, 2012). Quando absorvido pelas plantas, esse elemento pode induzir, direta e indiretamente, diversas alterações morfológicas, fisiológicas e bioquímicas, tais como: inibição da germinação de sementes, diminuição do crescimento, redução da produção de clorofilas, peroxidação lipídica, estresse oxidativo, danos ao material genético e alterações da atividade enzimática (Shahid et al., 2012).

Ainda, com base na tabela, evidenciou-se que a aplicação de água produzida tratada promoveu aumento dos teores do macronutriente Ca, dos micronutrientes Fe e Cu e dos metais Cr, Ni e Cd no tecido vegetal dos cladódios da palma forrageira, quando comparados os tratamentos T1 e T5.

Em trabalho semelhante, Costa (2018) constataram que a aplicação da água produzida tratada elevou os teores de Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Zn, Ni e Cd no tecido vegetal do girassol.

5.4.2 Acúmulo de nutrientes nas raízes

Constam, na Tabela 13, os valores médios da composição nutricional das raízes de palma forrageira avaliada aos 240 DAP, como também os coeficientes de variação, erros-padrão e probabilidades obtidos com o teste de Tukey, além dos contrastes ortogonais de médias dos tratamentos aplicados.

O teor de K nas raízes da palma apresentou efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. Comparando-se as médias, observou-se que o menor valor médio foi verificado para o tratamento T1, somente água subterrânea, sendo este igual a 10,96 g kg^{-1}; enquanto o tratamento T4 apresentou o maior valor, 16,91 g kg^{-1}. Com relação aos contrastes ortogonais, houve diferença estatística significativa a 1% de probabilidade para o contraste C2, indicando que o teor médio de K do tratamento T4 diferiu de T1, T2 e T3.

Conforme a caracterização físico-química das diluições (Tabela 9), o tratamento T4 apresentou maior teor de K quando comparado aos tratamentos T1, T2 e T3, o que pode explicar sua maior absorção pelas raízes da palma submetidas a esse tratamento.

Sousa et al. (2016) constataram que o teor de K nas raízes do girassol irrigado com água produzida tratada por filtração, por osmose reversa e com água subterrânea foi influenciado pelo tempo de cultivo, sendo maior durante o primeiro ciclo, reduzindo ao longo do segundo e terceiro.

Tabela 13. Estado nutricional das raízes de palma forrageira avaliadas aos 240 dias após o plantio

Tratamentos	Acúmulo de nutrientes nas raízes											
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
	.....g kg^{-1}.....			.....mg kg^{-1}.....								
T1	10,96a	3,88	2,01a	5456,07	3939,00	130,48	11,03	35,05	0,076	0,08ab	0,01	0,22a
T2	13,38abc	2,99	2,34a	6093,28	3301,50	175,33	10,43	41,31	0,066	0,08b	0,02	0,30a
T3	13,03ab	2,64	1,97a	5714,93	2601,83	122,95	9,00	39,98	0,058	0,06a	0,02	0,29a
T4	16,91c	4,39	3,35a	4719,30	3424,00	177,05	10,93	42,17	0,070	0,10b	0,03	0,47b
T5	14,74bc	3,73	2,87a	4340,96	2852,50	150,85	10,45	44,76	0,070	0,08ab	0,02	0,40b
Média	13,80	3,53	2,51	5264,91	3223,76	151,33	10,37	40,65	0,068	0,08	0,02	0,33
CV (%)	14,10	29,77	29,08	25,21	24,72	29,44	18,43	29,79	13,15	16,17	24,38	13,55
Erro-Padrão	0,87	0,47	0,33	593,48	356,37	19,93	0,85	5,42	0,004	0,006	0,002	0,02
Probabilidade	0,01**	NS	0,04*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**	0,01**	0,01**
Probabilidade dos contrastes (decimal)												
Contraste $C_{1:\ T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{2:\ T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	0,01**	NS	0,01**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**	0,01**	0,01**
Contraste $C_{3:\ T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	0,03*	NS	NS	NS	0,02*	0,01**	0,01*	NS
Contraste $C_{4:\ T2\ Vs\ T1}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**

Nota: T1 – Somente água subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Na – sódio; Fe – ferro; Mn – manganês; Cu – cobre; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio e Pb – chumbo. $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Apesar de não apresentar diferença estatística pelo teste de Tukey, observou-se uma maior concentração de Ca (4,39 g kg^{-1}) nas raízes das palmas submetidas ao tratamento T4.

Resultados semelhantes foram descritos por Weber et al. (2017) na irrigação da cultura do girassol utilizando água produzida tratada por osmose reversa, em que os teores de Ca no tecido vegetal das raízes foram iguais a 3,33, 5,30 e 2,07 g kg^{-1} para o primeiro, segundo e terceiro ciclo da cultura, respectivamente.

Já com relação aos teores de Mg nas raízes, houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey, com média geral igual a 2,51 g kg^{-1}. Ao verificar-se a comparação entre os contrastes ortogonais, as médias apresentaram diferença estatística a 1% de probabilidade para o contraste C2, indicando que o teor médio de Mg das raízes submetidas ao tratamento T4 difere do T1, T2 e T3.

Analisando os teores de Mg nas diluições de água produzida tratada (Tabela 9), observa-se que tratamento T4 apresentou maior valor quando comparado aos tratamentos T1, T2 e T3, elucidando o fato desse macronutriente apresentar um maior acúmulo no tecido vegetal das raízes submetidas a esse tratamento.

Sousa et al. (2016) observaram que as plantas irrigadas com água produzida tratada por osmose reversa acumularam maiores teores de Mg nas raízes, em comparação aos obtidos pela irrigação com água subterrânea (testemunha), durante três ciclos de cultivo.

No que se refere aos teores de Na, assim como no solo e nos cladódios, os menores valores foram encontrados nas raízes das palmas que receberam o tratamento T5. Esse fato pode ser justificado devido a água produzida tratada apresentar uma baixa concentração desse elemento, como apresentado na Tabela 8.

Comparando-se as Tabelas 12 e 13, é possível constatar que o acúmulo de K, Ca e Mg foi mais elevado nos cladódios do que nas raízes, enquanto o Na apresentou efeito contrário. Tendências semelhantes foram observadas em trabalho desenvolvido por Sousa et al. (2016), nas raízes e parte aérea do girassol cultivado durante três ciclos em áreas irrigadas com água produzida tratada por filtração, por osmose reversa e com água subterrânea.

Para Fageria (1991), o excesso do cátion Na no meio de crescimento das raízes promove competição pelos sítios de absorção, especialmente de K, Ca e Mg, podendo levar à deficiências nutricionais na planta. Esse fato foi confirmado por Viana et al. (2001) em videiras cultivadas em condições salinas. Esses autores constataram que o Na diminuiu a concentração de K, Ca e Mg em tecidos de folhas e caules. A associação entre altos valores de Na e elevadas relações Na/K, Na/Ca e Na/Mg acarreta redução do crescimento e rendimento das culturas (Santos et al., 2009).

Não houve efeito significativo entre os tratamentos com relação ao teor de Fe pelo teste de Tukey. Analisando os contrastes ortogonais, averiguou-se que o contraste C3 foi significativo a 5% de probabilidade, apontando que a concentração de Fe nas raízes submetidas ao tratamento T3 diferiu estatisticamente de T1 e T2.

Conforme a caracterização físico-química das diluições de água produzida tratada (Tabela 9), o tratamento T3 foi o que apresentou uma menor concentração de Fe (0,006 mg L^{-1}), justificando o fato de as raízes das palmas submetidas a esse tratamento acumularem um menor teor desse nutriente em seu tecido vegetal.

De acordo com Fernandes (2006), as concentrações de Fe nas plantas variam entre 10 e 1500 mg kg^{-1} de matéria seca, dependendo da parte da planta e da espécie. Entretanto, observou-se que os teores médios de Fe nas raízes da palma forrageira estão bem acima do limite estabelecido pelo referido autor.

Durante o segundo ciclo de cultivo do girassol irrigado com água produzida tratada por osmose reversa, por filtração e com água subterrânea, Weber et al. (2017) também encontraram um elevado acúmulo de Fe no tecido vegetal das raízes, sendo os teores iguais a 3.151,40, 1.648,63 e 2.168,63 mg kg^{-1}, respectivamente.

A toxicidade por ferro pode gerar escurecimento, flacidez e inibição do crescimento das raízes (Siqueira-Silva, 2012), além de causar desbalanços nutricionais nas plantas, induzindo a deficiência de alguns minerais essenciais tais como P, Ca, Mg, K e Zn (Audebert & Fofana, 2009).

Na absorção do Fe, os prótons são liberados do interior das raízes, o que provoca a acidificação da rizosfera. Nessas condições, o Fe^{3+} é reduzido a Fe^{2+} na membrana plasmática das células das raízes. Se a taxa de extrusão de prótons não for uniformemente distribuída ao longo do sistema radicular, mas confinada a certas zonas das raízes, a eficiência dessas zonas pode ser alta em termos de absorção de Fe (Marschner & Römheld, 1994).

No que se refere ao Mn, ao comparar as Tabelas 12 e 13, pode-se constatar que o acúmulo desse elemento foi maior nos cladódios do que nas raízes da palma. Isso se deve ao fato de o Mn ser facilmente translocado através do xilema das raízes até as brotações (Horst & Marschner, 1978). Na condição de bom suprimento de Mn, as folhas acumulam altas concentrações conforme avança a idade da planta, sendo uma pequena parcela do elemento translocada das folhas mais velhas para as novas (Heenan & Campbell, 1980).

O Mn ocorre na seiva das plantas na forma livre Mn^{2+}. Kabata-Pendias & Pendias (1985), relatam uma concentração menor de Mn em exsudatos do floema do que em tecidos das folhas, indicando que o pequeno transporte do elemento via floema é responsável pela sua baixa concentração em órgãos de reserva das raízes.

Em relação ao Cu, assim como nos cladódios, o teor desse elemento nas raízes esteve compreendido dentro da faixa considerada adequada (5 a 30 mg kg^{-1}) para um crescimento normal das plantas, conforme Ballabio et al., 2018).

O aumento na exsudação de substâncias quelantes e no pH da rizosfera são alterações que reduzem a biodisponibilidade do Cu, favorecendo a complexação do Cu^{2+} (Bravin et al., 2012). Por outro lado, a acidificação da rizosfera pode contribuir significativamente para aumentar o Cu disponível (Tomasi et al., 2009).

O Zn é absorvido na forma Zn^{+2}, tanto por via radicular como foliar. As raízes contêm muito mais Zn do que a parte aérea; mas, com o excesso de Zn, o mesmo é translocado das raízes e acumulados na parte aérea das plantas, nos cloroplastos, membrana celular e fluído dos vacúolos (Kabata-Pendias & Pendias, 1985), o que pode explicar seu maior acúmulo nos cladódios do que nas raízes da palma forrageira.

Em se tratando das concentrações de Cr na matéria seca das raízes da palma, não foi constatado efeito significativo em relação aos tratamentos. Ao comparar os contrastes ortogonais, houve efeito significativo a 5% de probabilidade para o contraste C3, indicando que o teor de Cr nas raízes que receberam o tratamento T3 diferiu de T1 e T2.

Em geral, a capacidade do solo de imobilizar a maioria dos metais pesados aumenta com o aumento do pH, em particular em condições alcalinas, mas o Cr é altamente móvel em condições neutras a alcalinas, podendo acumular-se na planta, conforme Stanin (2005).

Na composição do tecido vegetal das raízes, a concentração de Ni apresentou diferença estatística significativa a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey. Observando os contrastes ortogonais, houve efeito significativo ao nível de 1% de probabilidade para os contrastes C2 e C3, indicando que o teor de Ni do tratamento T4 diferiu de T1, T2, e T3, e do tratamento T3 diferiu de T1 e T2.

Na presença de Ni, o conteúdo de nutrientes minerais nos órgãos da planta pode aumentar, diminuir ou permanecer inalterado (Ahmad et al., 2007), pois uma das prováveis razões para a redução da absorção de minerais (micro ou macro) é a competição por sítios de ligações comuns, devido a raios iônicos comparáveis de Ni e outros íons (Chen et al., 2009).

Estatisticamente, houve efeito significativo a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey para o Cd em relação aos tratamentos estudados. Através do estudo dos contrastes ortogonais, observou-se que houve diferença estatística aos níveis de 1 e 5% de probabilidade para os contrastes C2 e C3, respectivamente.

Segundo Lombi et al. (2001) a imobilização de Cd externamente, ou na raiz, pode ser uma das primeiras barreiras de defesa da planta contra a toxicidade a este metal pesado. Em geral, os níveis de Cd tendem a ser maiores nas raízes do que nas folhas, acumulando

principalmente no vacúolo ou parede celular, sendo baixo o nível de transporte deste para a parte aérea (Milner & Kochian, 2008).

O maior aporte de Pb nas raízes da palma ocorreu no tratamento T4 (0,47 mg kg^{-1}), sendo verificado efeito significativo a 1% de probabilidade para esse elemento em relação aos tratamentos testados. Ainda, houve diferença estatística ao nível de 1% de probabilidade para os contrastes ortogonais C1, C2 e C4.

Nos experimentos realizados por Cannata et al. (2015), observou-se a baixa translocação do Pb e Cd para as partes aéreas das plantas (*Phaseolus vulgaris* L.), sendo mais concentrado nas raízes. Esse fato pode ser atribuído ao mecanismo de liberação de substâncias pelas raízes, como ácidos orgânicos, formando quelatos e dificultando com isso a subida do metal para a planta. Comportamento contrário foi observado no presente estudo (exceto para o T4), em que a concentração de Pb foi maior nos cladódios do que nas raízes da palma forrageira.

Dessa forma, analisando o acúmulo de nutrientes no tecido das raízes da palma forrageira, constatou-se que a aplicação de água produzida tratada elevou os teores dos macronutrientes K e Mg, dos micronutrientes Mn e Zn e dos metais Pb, Cd e Ni, quando comparados os tratamentos T1 e T5.

5.5 Características produtivas e morfométricas da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

De acordo com a análise de variância (Tabela 14), pode-se verificar que as diluições de água produzida tratada não influenciaram significativamente as variáveis produtivas massa úmida do cladódio (MUC) e massa seca do cladódio (MSC), como também as variáveis morfométricas altura da planta (H), número de cladódios por planta (NCP), comprimento médio de cladódios (CMC), largura média de cladódios (LMC), perímetro médio de cladódios (PMC) e espessura média de cladódios (EMC). Verifica-se, também, que os contrastes ortogonais entre os tratamentos, para as variáveis em estudo, não apresentaram diferença estatística significativa.

Com relação as características produtivas, apesar de não apresentarem diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos, observou-se que o tratamento T3 (50% de água produzida tratada e 50% de água subterrânea) possibilitou valores máximos de MUC (190,74 kg $vaso^{-1}$) e MSC (15,64 kg $vaso^{-1}$). Já os menores valores médios de MUC e MSC foram observados para o tratamento T4 (75% de água produzida tratada e 25% de água subterrânea), sendo iguais a 127,08 e 10,54 kg $vaso^{-1}$, respectivamente.

Tabela 14. Características produtivas e morfométricas da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Tratamentos	Características produtivas e morfométricas							
	MUC	MSC	H	NCP	CMC	LMC	PMC	EMC
	.....kg vaso^{-1}.....		cm	und	.....cm.....			
T1	165,86	15,04	26,40	2,60	13,58	6,44	14,22	10,48
T2	180,74	15,58	26,60	3,00	15,96	5,78	12,84	10,48
T3	190,74	15,64	28,80	2,60	13,82	6,32	14,42	11,80
T4	127,08	10,54	23,70	2,00	12,56	6,18	13,92	9,10
T5	164,16	15,62	27,80	2,20	14,06	6,54	14,92	11,42
Média	165,72	14,48	26,66	2,48	14,00	6,25	14,06	10,66
CV (%)	35,51	34,34	19,25	28,80	25,23	11,46	11,76	22,89
Erro-Padrão	26,31	2,22	2,29	0,32	1,58	0,32	0,74	1,09
Probabilidade	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Probabilidade dos contrastes (decimal)								
Contraste $C_{1:\ T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{2:\ T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{3:\ T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Contraste $C_{4:\ T2\ Vs\ T1}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: T1 – Somente água subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 - 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; MUC – massa úmida dos cladódios; MSC – massa seca dos cladódios; H – altura da planta; NCP – número de cladódios por planta; CMC – comprimento médio dos cladódios; LMC – largura média dos cladódios; PMC – perímetro médio dos cladódios; EMC – espessura média dos cladódios. $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

O maior valor de MUC observado no T3 pode estar relacionado aos maiores teores de nutrientes essenciais, como Ca e Fe, encontrados nos cladódios das palmas submetidas a esse tratamento, conforme Tabela 12. O íon Ca desempenha papel importante no desenvolvimento vegetal e regulação metabólica, atuando como um regulador intracelular importante de numerosos processos químicos e metabólicos (Novais et al., 2007).

Costa (2018), avaliando o girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea, verificou que o tratamento T5 (100% de água produzida tratada) obteve a maior produtividade da cultura, com valor médio de 565,35 kg ha^{-1}.

Crisóstomo et al. (2016) constataram que a irrigação com água produzida tratada por osmose reversa propiciou aumento da biomassa seca das raízes e dos capítulos do girassol, durante os três ciclos da cultura. Já Sousa et al. (2016) constataram que as plantas irrigadas com água produzida filtrada acumularam maiores teores de sódio em raízes e na parte aérea, afetando negativamente a produção de biomassa e de grãos de girassol.

Observando as características morfométricas, verificou-se que os maiores valores de H e EMC foram observados para o tratamento T3, apresentando médias iguais a 28,80, 11,80 cm; enquanto as menores médias para essas variáveis foram constatadas para os cladódios submetidos ao tratamento T4.

Uma provável justificativa para esse declínio nos valores dessas variáveis, quando aplicado o T4, pode estar relacionada a maior concentração do cátion K nessa diluição.Deve-se levar em consideração que o excesso de K pode interferir, positiva ou negativamente, na absorção de outros cátions pelas plantas, considerando que a taxa de absorção de um íon pode ser afetada por outro, desde que estejam competindo diretamente pelo mesmo sítio (Novais et al., 2007). O teor de K na planta aumenta a taxa de absorção de NO_3^- e é capaz de inibir as de Ca e Mg (Marschner, 1995), podendo afetar o desenvolvimento da cultura.

Costa (2018) não observou efeito das diluições de água produzida tratada sobre a altura do girassol irrigado, no entanto, a maior média para essa variável foi observada no tratamento T5 (somente água produzida tratada), ao passo que a menor média foi constatada no tratamento T1 (somente água subterrânea).

As características LMC e PMC apresentaram médias superiores no tratamento T5, sendo estas iguais a 6,54 e 14,92 cm, respectivamente; ao passo que as menores médias foram observadas para o tratamento T2.

Para as variáveis NCP e CMC, os maiores valores médios foram constatados para o tratamento T2, sendo a menor média observada para o tratamento T4. Semelhantemente, Costa (2018) averiguou que o tratamento T2 (25% de água subterrânea e 75% de água produzida tratada) obteve a maior quantidade de folhas do girassol irrigado.

Enfim, a aplicação da água produzida tratada diluída ou não, não comprometeu nem o desenvolvimento e nem a produtividade da palma, quando comparada ao tratamento testemunha (100% água subterrânea).

O tratamento T3, apesar de não diferir estatisticamente dos demais tratamentos, promoveu altura das plantas e espessura dos cladódios superiores, além de elevações nas produções de matéria verde e matéria seca, evidenciando que a dose aplicada de 50% de água produzida tradada consegue atender de forma satisfatória as necessidades da cultura da palma.

5.6 Capacidade fitoextratora da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

5.6.1 Fator de translocação (FT) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Na Tabela 15 estão apresentados os valores do fator de translocação (FT) da palma forrageira, aos 240 DAP, referente aos elementos K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd e Pb, assim como o CV (%), o erro-padrão, a probabilidade pelo teste F, comparação de médias pelo teste de Tukey e comparação dos tratamentos pelos contrastes ortogonais.

O FT expressa a razão entre a concentração de elementos nas raízes das plantas e a concentração na parte aérea (Branzini et al., 2012). Notou-se que as plantas de palma forrageira apresentaram efeitos significativos em relação aos tratamentos apenas para as variáveis Ca e Pb.

Com relação ao FT do K, observa-se que não houve efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey entre os tratamentos estudados. É possível constatar que ao aumentar a proporção de água produzida tratada, o FT do K diminuiu, apresentando maior valor médio (6,41) para o tratamento T1 e menor valor médio (4,29) para o tratamento T5. Também não houve diferença estatística entre os contrastes ortogonais.

Verifica-se que os valores médios de K para todos os tratamentos foram maiores do que 1 (Ma et al., 2001; Fayiga, et al., 2006), evidenciando que ocorreu a translocação desse elemento das raízes até os cladódios. Não se tem conhecimento de toxidez causada pelo K em plantas, apesar de este nutriente ser absorvido por muitas espécies em quantidades superiores às necessárias; no entanto, o excesso de potássio pode interferir negativamente na absorção de outros cátions pela planta, com Ca e Mg (Fernandes, 2006).

Tabela 15. Fator de translocação (FT) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida em água subterrânea

Tratamentos	Fator de translocação											
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
T1	6,41	9,85a	12,65	0,08	0,03	8,25	0,79	2,13	0,51	1,66	1,92	1,98c
T2	5,20	15,88ab	10,89	0,08	0,04	6,92	0,82	3,44	0,68	2,12	2,03	2,12c
T3	4,85	17,55b	11,20	0,08	0,05	7,96	0,97	1,97	0,72	2,67	0,95	1,80bc
T4	4,73	8,67a	8,63	0,10	0,04	5,64	0,81	1,47	1,08	1,64	1,00	0,76a
T5	4,29	11,53ab	6,82	0,08	0,04	7,70	0,85	1,41	0,86	1,82	1,75	1,04ab
Média	5,09	12,70	10,04	0,08	0,04	7,29	0,85	2,09	0,77	1,98	1,53	1,54
CV (%)	26,54	30,60	38,20	28,22	32,36	34,28	19,82	70,35	43,41	36,43	44,00	27,96
Erro-Padrão	0,60	1,74	1,71	0,01	0,01	1,12	0,07	0,66	0,15	0,32	0,30	0,19
Probabilidade	NS	0,01**	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**
Probabilidade dos contrastes (decimal)												
Contraste $C_{1: T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	0,05*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{2: T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	0,02*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,02*	NS	NS	0,01**
Contraste $C_{3: T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	0,04*	NS	NS	0,02*	NS	NS	NS	NS	NS	0,01*	NS
Contraste $C_{4: T2\ Vs\ T1}$	NS	0,03*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Nota: T1 – Somente água de subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 – 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Na – sódio; Fe – ferro; Mn – manganês; Cu – cobre; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb – chumbo; $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 – 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Para o FT do elemento Ca, houve diferença estatística pelo teste de Tukey a 1% de probabilidade entre os tratamentos, sendo a maior média observada no tratamento T3 (17,55). Comparando os contrastes ortogonais, pôde-se perceber que C2, C3 e C4 foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste F, indicando que o FT do Fe em T4 difere de T1, T2 e T3, em T3 difere de T1 e T2 e em T2 difere de T1. O FT para o Ca apresentou valor médio igual a 12,70, indicando que a espécie é eficiente em translocar esse íon da raiz até a parte aérea.

Verificou-se que a capacidade da palma forrageira em translocar o Mg foi maior quando submetida ao tratamento T1 (apenas água subterrânea), enquanto o menor valor médio foi observado para o tratamento T5, sendo este igual a 6,82. Entretanto, o FT médio foi superior a 1, mostrando que esta cultura é eficiente em translocar o Mg da raiz até os cladódios.

Conforme Malavolta (1979), de modo geral, os teores de Mg nas partes novas das plantas são maiores que os encontrados nas mais velhas, embora o inverso possa ocorrer também. O Mg se move em direção a corrente transpiratória; ao contrário do que se dá com o Ca e de modo semelhante ao que ocorre com o K, o Mg é móvel no floema, ocorrendo translocação na planta.

Para o elemento Na não houve efeito significativo pelo teste de Tukey entre os tratamentos, como também não ocorreu diferença estatística entre os contrastes ortogonais. O valor médio do FT de Na nas plantas foi menor que 1, indicando que a cultura é ineficiente em translocar o Na das raízes para os cladódios. De acordo com Prado (2008), o Na tem a capacidade de substituir o K em funções não específicas, como o K vacuolar, quando o suprimento deste é limitado.

Não houve efeito significativo a um nível de 5% de probabilidade com relação ao Fe. Entretanto, analisando os contrastes ortogonais, constatou-se que o C3 apresentou diferença estatística significativa, indicando que o FT do Fe no tratamento T3 difere de T1 e T2. Observou-se, ainda, que não ocorreu a translocação desse micronutriente das raízes até os cladódios, pois a média de todos os tratamentos foi menor que 1.

Em relação ao metabolismo do Fe na planta, deve-se levar em consideração que este apresenta baixa mobilidade nos tecidos vegetais. Essa mobilidade é afetada, negativamente, por vários fatores, como elevado conteúdo de P, deficiência de K, quantidade elevada de Mn e baixa intensidade luminosa (Fernandes, 2006).

Para o teor de Mn, o tratamento T1 apresentou a maior média (8,25), apesar de não haver diferença estatística entre os tratamentos e entre os contrastes ortogonais. Verificou-se que todos os tratamentos apresentaram médias de FT maiores que 1, indicando assim a característica fitoextratora dessa espécie a este micronutriente.

Não houve efeito significativo a um nível de 5% de probabilidade para o Cu, assim como também não foi constatada diferença estatística entre os contrastes ortogonais. As médias dos tratamentos apresentaram FT inferior a 1, evidenciando maior acúmulo desse elemento nas raízes.

Para o Zn, observou-se que a capacidade da palma forrageira em translocar esse elemento das raízes para a parte aérea não foi significativo. Também não houve efeito significativo com relação ao estudo dos contrastes ortogonais ao nível de 5% de probabilidade. A média do FT para todos os tratamentos foi maior que 1, indicando que houve a translocação do Zn das raízes até os cladódios.

Com relação ao FT do Cr, não houve efeito significativo pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade para esse elemento. Entretanto, notou-se que houve diferença estatística para o contraste C2, indicando que o FT desse elemento no tratamento T4 difere de T1, T2 e T3. Verificou-se que apenas o tratamento T4 apresentou média superior a 1, indicando que as plantas submetidas a esse tratamento foram eficientes em translocar o Cr da raiz até os cladódios.

Para o FT do Ni, não houve diferença estatística entre os tratamentos estudados, assim como quando comparados os contrastes ortogonais. Mesmo assim, o valor médio do FT foi superior a 1 em todos os tratamentos, evidenciando que ocorreu translocação desse elemento das raízes até a parte aérea.

Também não foi constatado efeito significativo para o FT do elemento Cd em relação aos tratamentos. No entanto, pelo estudo dos contrastes, notou-se que houve diferença estatística para o contraste C3, indicando que o FT do Cd em T3 difere de T1 e T2. Observou-se, ainda, que ocorreu translocação desse elemento da raiz para a parte aérea em todos os tratamentos, exceto para o T3 que apresentou média menor que 1.

Para o Pb, houve diferença estatística a 1% de probabilidade pelo teste de Tukey em relação aos tratamentos, sendo o maior valor médio do FT encontrado em T2. Além disso, analisando os contrastes ortogonais, houve efeito significativo a 1% de probabilidade para o contraste C1, indicando que o FT do Pb no tratamento T5 difere dos demais, e para o contraste C2, demonstrando que T4 difere de T1, T2 e T3. Apenas o tratamento T4 apresentou valor médio do FT menor que 1, evidenciando que não ocorreu a translocação de Pb das raízes até os cladódios.

Plantas com maiores quantidades acumuladas de metais no sistema radicular, em relação a parte aérea, são classificadas como espécies tolerantes à absorção dos metais (Garbisu & Alkorta, 2001). Conforme Branzini et al. (2012), as raízes podem desempenhar um papel importante na retenção de metais, impedindo um acúmulo excessivo e tóxico na parte aérea.

Analisando a capacidade fitoextratora do girassol irrigado com diluições de água produzida tratada em água subterrânea, Costa (2018) constatou que a cultura apresentou eficiência apenas na translocação do elemento Na.

A palma forrageira apresentou alta capacidade em translocar K, Ca, Mg, Mn, Zn, Ni, Cd e Pb da raiz para a parte aérea, tendo em vista que para esse fator, todos os valores foram maiores que a unidade. Esse comportamento era esperado em função da essencialidade da maioria desses elementos para o desenvolvimento das plantas, o que favorece a translocação dos mesmos das raízes para os cladódios.

5.6.2 Fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Na Tabela 16 estão apresentados os valores médios do fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira, aos 240 DAP,relacionado aos elementos K, Ca, Mg, Na, Fe, Mn, Cu, Zn, Cr, Ni, Cd e Pb, assim como o CV (%), o erro-padrão, a probabilidade pelo teste F, comparação de médias pelo teste de Tukey e comparação dos tratamentos pelos contrastes ortogonais.

O FB mede a capacidade da planta em absorver o elemento do solo e depois bioacumular no tecido da parte aérea ou raiz (Branzini et al., 2012). Para esse fator, foi constatado efeito significativo pelo teste de Tukey em relação aos tratamentos apenas para as variáveis Mg, Ni e Cd.

Em todos os tratamentos, as médias de FB do K foram maiores que 1, evidenciando que a palma forrageira tem a capacidade de extrair esse elemento e armazenar em seus tecidos vegetais. Entretanto, não houve efeito significativo a 5% de probabilidade pelo teste F e nem quando comparados os contrastes ortogonais.

Os valores de FB do Ca não apresentaram efeito significativo em relação aos tratamentos estudados, sendo que o tratamento T2 apresentou a maior média (1190,41). Ainda, verificou-se diferença estatística a um nível de 5% de probabilidade para o contraste ortogonal C4, indicando que o tratamento T2 diferiu de T1. As médias do FB para esse elemento foram maiores que 1, evidenciando a capacidade da planta de palma forrageira bioacumular esse macronutriente.

Tabela 16. Fator de bioacumulação (FB) da palma forrageira irrigada com diluições de água produzida em água subterrânea

Tratamentos	Fator de bioacumulação											
	K	Ca	Mg	Na	Fe	Mn	Cu	Zn	Cr	Ni	Cd	Pb
T1	2047,16	457,87	865,04b	30,77	1655,11	2684,86	16425,00	569,94	2,72	52,01bc	9,00a	8,51
T2	2126,43	1190,41	581,40ab	40,10	1407,48	3319,22	10851,56	752,47	11,30	37,97ab	75,25b	23,74
T3	1724,84	595,46	613,56ab	36,94	1086,93	2702,10	5115,81	543,36	2,52	33,44a	21,50a	35,71
T4	2169,77	452,01	411,50ab	34,66	1373,11	2216,38	2602,94	529,13	3,02	53,35c	30,00a	33,88
T5	1872,34	749,26	309,49a	37,25	1199,77	2600,08	7875,00	522,26	4,44	24,17a	39,67a	2,54
Média	1988,11	689,00	556,20	35,94	1344,48	2704,53	8574,06	583,43	4,80	40,19	35,08	20,87
CV (%)	25,63	74,31	48,53	33,15	23,97	37,71	83,88	28,10	100,46	18,85	49,05	169,46
Erro-Padrão	227,89	228,97	120,72	5,33	144,12	456,12	3216,42	73,32	2,16	3,39	7,69	15,82
Probabilidade	NS	NS	0,04*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**	0,01**	NS
Probabilidade dos contrastes (decimal)												
Contraste $C_{1:\ T5\ Vs\ (T1 + T2 + T3 + T4)}$	NS	NS	0,03*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01**	NS	NS
Contraste $C_{2:\ T4\ Vs\ (T1 + T2 + T3)}$	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,03*	NS	NS	0,01*	NS	NS
Contraste $C_{3:\ T3\ Vs\ (T1 + T2)}$	NS	NS	NS	NS	0,02*	NS	0,05*	NS	NS	0,01*	0,04*	NS
Contraste $C_{4:\ T2\ Vs\ T1}$	NS	0,04*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	0,01*	0,01**	0,01**	NS

Nota: T1 – Somente água subterrânea (AS), T2 – 75% de AS e 25% de água produzida tratada (AP), T3 – 50% de AS e 50% de AP, T4 – 25% de AS e 75% de AP, e T5 – somente AP; K – potássio; Ca – cálcio; Mg – magnésio; Na – sódio; Fe – ferro; Mn – manganês; Cu – cobre; Zn – zinco; Cr – cromo; Ni – níquel; Cd – cádmio; Pb – chumbo; $C_1 = 12\ m_1 + 12\ m_2 + 8\ m_3 + 10\ m_4 - 42\ m_5$; $C_2 = 30\ m_1 + 30\ m_2 + 20\ m_3 - 80\ m_4$; $C_3 = 6\ m_1 + 6\ m_2 - 12\ m_3$; $C_4 = 6\ m_1 - 6\ m_2$.

Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

** e *Significativos a 1 e 5 % de probabilidade pelo teste F, respectivamente.

NS - Não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F.

Fonte: Acervo da pesquisadora (2019).

Para o FB do Mg, houve diferença significativa entre os tratamentos pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade. Também ocorreu efeito significativo ao nível de 5% de probabilidade para o contrate ortogonal C1, mostrando que o tratamento T5 diferiu dos demais. O maior valor médio de FB foi observado para o tratamento T1, enquanto o menor valor foi constatado para o T5.

Com relação ao teor de Na, não houve efeito significativo para as médias dos tratamentos estudados e nem para os contrastes ortogonais. Mesmo assim, os valores médios do FB foram superiores a 1, evidenciando a bioacumulação deste elemento na planta.

Estatisticamente, não houve significância a 5% de probabilidade para o FB do Fe. O maior e menor valor médio foi observado para os tratamentos T1 e T3, respectivamente. No entanto, houve diferença significativa a 5% de probabilidade para o contraste ortogonal C3. O micronutriente Fe apresentou valores de FB maiores que 1 para todos os tratamentos, denotando a eficiência da planta em extrair esse elemento do solo e bioacumular nas partes vegetais.

Para o FB do Mn não houve efeito significativo entre os tratamentos e nem ao verificar-se os contrastes ortogonais. Ainda, o FB foi maior que 1 em todos os tratamentos, indicando bioacumulação desse elemento na planta. Conforme Kovácik et al. (2018), o excesso de Mn pode afetar a sorção de vários nutrientes, competindo fortemente com cátions divalentes, principalmente Ca e Mg.

Em todos os tratamentos estudados, as médias de FB do Cu foram maiores que 1, indicando que a palma forrageira tem a capacidade de extrair esse elemento do solo e armazenar em seus tecidos vegetais. Não houve efeito significativo ao comparar as médias entre os tratamentos, entretanto, os contrastes ortogonais C2 e C3 apresentaram diferença estatística significativa a 5% de probabilidade pelo teste F.

Tanto a deficiência quanto o excesso de Cu podem afetar o crescimento das plantas com efeitos drásticos sobre a produção da biomassa e o rendimento. A deficiência inibe o processo de fotossíntese e provoca um envelhecimento prematuro da planta (Kabata-Pendias & Pendias, 2001), enquanto o excesso de Cu pode alterar a germinação das sementes e a morfologia da planta (Adrees et al., 2015).

Para o teor de Zn, não houve efeito significativo entre as médias dos tratamentos e nem para os contrastes ortogonais. Notou-se que o FB em todos os tratamentos foi maior que 1, evidenciando a bioacumulação deste elemento na planta.

O Zn é um micronutriente essencial requerido pelas plantas em pequena quantidade, e está envolvido em várias funções fisiológicas, incluindo: estrutura da membrana, fotossíntese, metabolismo de lipídios e ácidos nucleicos, síntese proteica e defesa contra seca e doenças

(Noulas et al., 2018). pH alto e elevado conteúdo de P ou Mn podem induzir a deficiência de Zn (Rosen & Eliason, 2005).

Não houve efeito significativo para o FB do Cr, mesmo assim, ocorreu diferença estatística a 5% de probabilidade para o contraste ortogonal C4, indicando que o tratamento T2 diferiu de T1. Todas as médias foram superiores a 1, sendo o maior valor observado para o tratamento T2, apresentando FB igual a 11,30.

Vários estudos relatam que a fitotoxicidade do Cr, a taxa de acúmulo e a translocação para brotos e folhas dependem de diferentes espécies de plantas, biodisponibilidade e concentração inicial no meio (Yu et al., 2007). O pH do solo, o teor de MO e os agentes quelantes estão entre os diferentes parâmetros que desempenham um papel importante na absorção e translocação de Cr (Zhang et al., 2010).

Com relação ao FB para o Ni, constatou-se que os tratamentos diferiram estatisticamente entre si a 1% de probabilidade pelo teste F. Analisando os contrastes ortogonais, houve efeito significativo a 1% de probabilidade para os contrastes C1 e C4, e a 5% de probabilidade para os contrastes C2 e C3. Todas as médias foram maiores que 1, evidenciando a capacidade da palma em extrair o elemento do solo e armazenar em seus tecidos vegetais.

O Ni é um micronutriente indispensável para o metabolismo das plantas (Bai et al., 2006). No entanto, semelhante ao Cd e ao Pb, esse elemento pode interagir com outros nutrientes essenciais da planta, determinando sua disponibilidade e absorção. O Ni tem um caráter semelhante ao Mg, Ca, Fe, Cu e Zn (Chen et al., 2009), podendo competir com esses nutrientes pelos sítios de ligação comuns devido aos raios de íons comparáveis.

As médias de FB do Cd para todos os tratamentos foram maiores que 1, sendo o menor e o maior valor observados para os tratamentos T1 e T2, respectivamente. Ocorreu diferença estatística a 1% de probabilidade entre as médias pelo teste F. Analisando os contrastes ortogonais, foi constatado que houve efeito significativo a 1% de probabilidade para o contraste C4 e a 5% de probabilidade para o contraste C3.

A mobilidade do Cd no solo e sua absorção pelas plantas dependem de vários fatores, incluindo concentração no solo, tipo de planta, pH, matéria orgânica do solo , CTC e concentrações de Fe e Zn (Meeus et al., 2002). Liu et al. (2015) relataram que, em geral, as diminuições no pH do solo levam a aumentos na quantidade de Cd dissolvido na solução do solo, ficando este prontamente disponível para a absorção da planta.

Para o Pb, não ocorreu efeito significativo entre as médias do FB dos tratamentos estudados e nem quando se verifica os contrastes ortogonais. Mesmo assim, todos os tratamentos apresentaram valores médios maiores que 1, indicando que existiu bioacumulação desse elemento.

Embora o Pb não seja um elemento essencial para as plantas, é facilmente absorvido e acumulado em diferentes partes da planta. A absorção de Pb nas plantas é regulada pelo pH, tamanho de partículas e CTC do solo, assim como por exsudação radicular e outros parâmetros físico-químicos. Seu excesso pode provocar vários sintomas de toxicidade as plantas como, por exemplo, crescimento atrofiado, clorose e escurecimento do sistema radicular (Sharma & Dubey, 2005).

A palma forrageira apresentou capacidade de bioacumular todos os nutrientes analisados em seus tecidos (raízes e cladódios), sendo o acúmulo de K, Fe, Mn e Cu mais expressivo quando comparado aos demais.

Ainda, buscando aprimorar os conhecimentos sobre o uso sustentável da água produzida para fins agrícolas, são necessários estudos complementares sobre os efeitos dos hidrocarbonetos, fenóis e outros metais pesados no sistema solo-planta.

6 CONCLUSÕES

O cultivo de palma forrageira irrigada com água produzida tratada mostrou-se viável, sendo uma alternativa para recuperação de solos contaminados por sais ou metais pesados, além de proteger o solo contra a erosão e economizar os recursos hídricos de boa qualidade.

Os teores de Na^+, Cl^-, CO_3^{2-} e HCO_3^- encontrados nas diluições de água produzida tratada podem limitar a utilização dessa água para fins de irrigação, devido, principalmente, a formação de precipitados químicos e ao risco de fitotoxicidade à cultura.

Em relação aos atributos físico-químicos do solo, os valores de Na^+, Ca^{2+}, Mg^{2+}, PST, Cr e Pb foram influenciados, significativamente, pelas aplicações de água produzida tratada diluída; entretanto, ocorreu aumento significativo com as diluições apenas para os teores de Mg^{2+}, Cr e Pb.

Expressões máximas do potencial da cultura podem não ser atingidas devido à baixa CTC do solo, bem como ao pH fora da faixa ideal para um bom desenvolvimento da cultura.

A aplicação de água produzida tratada promoveu elevação dos teores de Ca, Fe, Cu, Cr, Ni e Cd nos cladódios e de K, Mg, Mn, Zn, Pb, Cd e Ni nas raízes da palma forrageira, quando comparados os tratamentos T1 e T5.

Não ocorreu efeito negativo causado pela água produzida tratada nas características produtivas e morfométricas da palma forrageira. O tratamento T3 promoveu altura das plantas e espessura dos cladódios superiores, além de elevações nas produções de matéria verde e matéria seca, evidenciando que a dose aplicada de 50% de água produzida tradada consegue atender de forma satisfatória as necessidades da cultura.

A palma forrageira apresentou eficiência na translocação dos elementos K, Ca, Mg, Mn, Zn, Ni, Cd e Pb da raiz para a parte aérea, e na bioacumulação de todos os nutrientes analisados em seus tecidos (raízes e cladódios), sendo o acúmulo de K, Fe, Mn e Cu mais expressivo quando comparado aos demais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores – Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261, São Paulo: ABNT, 2006. 17p.

Adrees, M.; Ali, S.; Rizwan, M.; Zia-ur-Rehman, M.; Ibrahim, M.; Abbas, F.; Farid, M.; Qayyum, M.F.; Irshad, M. K. Mechanisms of silicon-mediated alleviation of heavy metal toxicity in plants: a review. Ecotoxicology Environmental Safety, v.119, p.186-197, 2015.

Ahmad, M. S. A.; Hussain, M.; Saddiq, R.; Alvi, A. K. Mungbean: a nickel indicator, accumulator or excluder? Bulletin of Environmental Contamination Toxicology, v.78, p.319-324, 2007.

Alderson, M. P.; Santos, A. B.; Mota Filho, C. R. Reliability analysis of low-cost, full-scale domestic wastewater treatment plants for reuse in aquaculture and agriculture. Ecological Engeering, v.82, p.6-14, 2015.

Allen, R. G.; Pereira, L. S.; Raes, D; Smith, M. Evapotranspiracióndel cultivo, Guías para la determinación de los requerimientos de água de los cultivos. Roma: FAO, 2006. 298p.

Alloway, B. J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans. Environmental Geochemistry and Health, v.31, p.537-548, 2009.

Alloway, B. J. Zinc in Soils and Crop Nutrition. Second ed., IZA and IFA. Brussels Belgium and Paris, France, 2008.

Almada, L. P.; Parente, V. Oil & Gas industry in Brazil: A brief history and legal framework. Panorama ofBrazilian Law, v.1, p.223-252, 2013.

Almeida, O. A. Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2010. 234p.

Álvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Moraes Gonçalves, J. L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. Meteorologische Zeitschrift, v.22, p.711-728, 2013.

Alzahrani, S.; Mohammad, A. W. Challenges and trends in membrane technology implementation for produced water treatment: a review. Journal of Water Process Engineering. v.4, p.107-133, 2014.

Amaral, A. S.; Anghinoni, I.; Deschamps, F. C. Resíduos de plantas de cobertura e mobilidade dos produtos da dissolução do calcário aplicado na superfície do solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.28, p.115-123, 2004.

Amini, S.; Mowla, D.; Golkar, M.; Esmaeilzadeh, F. Mathematical modelling of a hydrocyclone for the down-hole oil-water separation (DOWS). Chemical Engineering Research and Design, v.90, p.2186-2195, 2012.

Andrade, B. G.; Andrade, V. T.; Costa, B. R. S.; Campos, J. C.; Dez, M. Distillation of oil field produced water for reuse on irrigation water: evaluation of pollutants removal and ecotoxicity. Journal of Water Reuse and Desalination, v.1, p.224-236, 2011.

Angelim, L. A. A.; Angelim, V. C.; Nesi, J. R. ProgramaGeologia do Brasil – PLGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala. 01h50min. 000. Recife: CPRM/FAPERN, 2006. 1mapa color.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2018. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Boletim da Produção de Petróleo e Gás Natural, dezembro de 2014. Disponível em: <http://www.anp.gov.br/wwwanp/publicacoes/boletins-anp/2395-boletim-mensal-da production-de-petroleo-e-gas-natural>. Rio de Janeiro: ANP, 2016a.

ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis: 2016. Disponível em: <http://www.anp.gov.br>. Rio de Janeiro: ANP, 2016b.

Arba, M.; Falisse, A.; Choukr-Allah, R.; Sindic, M. Effects of irrigation at critical crop stages on fruit yield and quality of cactus pear (*Opuntia* spp.). Scientific Journal of Crop Science, v.5, p.73- 81, 2016.

Audebert, A.; Fofana, M. Rice yield gap due to iron toxicity in West Africa. Journal of Agronomy and Crop Science, v.195, p.66-76, 2009.

Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 218p. (Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 29, Revisado).

Bader, M. S. H. Seawater versus produced water in oil-fields water injection operations. Desalination, v.208, p.159-168, 2007.

Bai, C.; Reilly, C. C.; Wood, B. W. Nickel deficiency disrupts metabolism of ureides, aminoacids, and organic acids of young pecan foliage. Plant Physiology, v.140, p.433-443, 2006.

Bakke, T.; Klungsøyr, J.; Sanni, S. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. Marine Environmental Research, v.92, p.154-169, 2013.

Ballabio, C.; Panagos, P.; Lugato, E.; Huang, J.; Orgiazzi, A.; Jones, A.; Montanarella, L. Copper distribution in European topsoils: An assessment based on LUCAS soil survey. Science of the Total Environment, v.636, p.282-298, 2018.

Barrow, N. J. Effect of previous additions of phosphate on phosphate adsorption by soils. Soil Science, v.118, p.82-89, 1974.

Bataglia, O. C.; Furlani, A. M. C.; Teixeira, J. P. F.; Furlani, P. R.; Gallo, J. R. Métodos de análise química de plantas. Campinas: Instituto Agronômico, 1983. 48p. (Boletim Técnico, 78).

Batista, A. A.; Dutra, I.; Carmo, F. F.; Izidio, N. S. C.; Batista, R. O. Qualidade dos frutos de mamoeiro produzidos com esgoto doméstico tratado. Revista Ciência Agronômica, v.48, p.70-80, 2017.

Batista, C. M. A. Bacia potiguar: sumário geológico e setores em oferta. Brasil, 15ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás – ANP. (2017). Disponível em: http://www.brasilrounds.gov.br/arquivos/Round15/Mapas/Sumario_Geologico_Geologico_R15_Potiguar.pdf. Acesso em: 15 de dez. 2018.

Benavides, M. P.; Gallego, S. M.; Tomaro, M. L. Cadmium toxicity. Brazilian Journal of Plant Physiology, v.17, p.21-34, 2005.

Berilli, S. S.; Berilli, A. P. C. G.; Carvalho, A. J. C.; Freitas, S. J.; Cunha, M.; Fontes, P. S. F. Níveis de cromo em mudas de café conilon desenvolvidas em substrato com lodo de curtume como adubação alternativa. Coffee Science, v.10, p.320-328, 2015.

Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.

Bezerra, S. A. F.; Silva, T. G. F.; Souza, L. S. B.; Moura, M. S. B.; Morais, J. E. F.; Diniz, W. J. S.; Queiroz, M. G. Demanda hídrica bruta da palma forrageira em cenários futuros de mudanças climáticas no estado de Pernambuco. Revista Brasileira de Geografia Física, v.8, p.1628-1643, 2015.

Bhargava, A.; Carmona, F. F.; Bhargava, M.; Srivastava, S. Approaches for enhanced phytoextraction of heavy metals. Journal of Environmental Management, v.105, p.103-120, 2012.

Bichai, F.; Polo-López, M. I.; Ibañez, P. F. Solar disinfection of wastewater to reduce contamination of lettuce crops by *Escherichia coli* in reclaimed water irrigation. Water Research. v.46, p.6040-6050, 2012.

Binet, M. T.; Stauber, J. L.; Winton, T. The effect of storage conditions on produced water chemistry and toxicity. In: Lee, K.; Neff, J. Produced water, environmental risks and advances in mitigation technologies. Springer Science, 2011, Cap.7, 608p.

Bowles, T. M.; Acosta-Martínez, V.; Calderón, F.; Jackson, L. E. Soil enzyme activities, microbial communities, and carbon and nitrogen availability in organic agroecosystems across an intensively managed agricultural landscape. Soil Biology Biochemistry, v.68, p.252-262, 2014.

BP, 2017. British Petroleum (BP) Energy Outlook 2017 Edition: Data Tables [WWW Document]. URL. (Acessado em: 27 Ago. de 2018) http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/energy-outlook-downloads.html

Branzini, A.; Gonzaléz, R. S.; Zubillaga, M. Absorption and translocation of copper, zinc and chromium by *Sesbania virgata*. Journal of Environmental Management, v.102 p.50-54, 2012.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu

enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 18 mar. 2005. p.58-63.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 393 de 8 de agosto 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 9 ago. 2007, p.72-73.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 396 de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 7 abr. 2008. Seção 1, p.64-68.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 dez. 2009, p.81-84.

Brasil. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente CONAMA. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 16 mai. 2011a. p.89.

Brasil. Ministério da Saúde. Secretaria de Vigilância em Saúde. Coordenação-Geral de Vigilância em Saúde Ambiental. Portaria MS n.º 2914/2011. Brasília, 2011b.

Bravin, M. N.; Garnier, C.; Lenoble, V.; Gérard, F.; Dudal, Y.; Hinsinger, P. Rootinduced changes in pH and dissolved organic matter binding capacity affect copper dynamic speciation in the rhizosphere. Geochimica et Cosmochimica Acta, v.84, p.256-268, 2012.

Bressiani, D. A.; Gassman, P. W.; Fernandes, J. G.; Garbossa, L. H. P.; Srinivasan, R.; Bonumá, N. B.; Mendiondo, E. M. Review of soil and water assessment tool (SWAT) applications in Brazil: challenges and prospects. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v.8, p.9-35, 2015.

Bucks, D. A.; Nakayama, F. S.; Gilbert, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. Agricultural Water Management, v.2, p.149-162, 1979.

Burkhardt, A.; Gawde, A.; Cantrell, C. L.; Baxter, H. L.; Joyce, B. L.; Stewart Jr., C. N.; Zheljazkov, V. D. Effects of Produced Water on Soil Characteristics, Plant Biomass, and Secondary Metabolites. Journal of Environmental Quality, v.44, p.1938-1947, 2015a.

Burkhardt, A.; Gawde, A.; Cantrell, C. L.; Zheljazkov, V. D. Effect of varying ratios of produced water and municipal water on soil characteristics, plant biomass, and secondary metabolites of *Artemisia annua* and *Panicum virgatum*. Industrial Crops and Products, v.76, p.987-994, 2015b.

Cabral, J. R.; Freitas, P. S. L.; Rezende, R.; Muniz, A. S.; Bertonha, A. Impacto da água residuária de suinocultura no solo e na produção de capim-elefante. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.823-831, 2011.

Cakmak, I.; Yilmaz, A.; Kalayci, M.; Ekiz, H.; Torun, B.; Erenoglu, B.; Braun, H. J. Zn deficiency as a critical problem in wheat production in central Anatolia. Plant and Soil, v.180, p.165-172, 1996.

Cannata, M. G.; Bertoli, A. C.; Carvalho, R.; Augusto, A. S.; Bastos, A. R. R.; Freitas, M. P.; Carvalho, J. G. Stress induced by heavy metals cd and pb in bean (*Phaseolus vulgaris* l.) grown in nutrient solution. Journal of Plant Nutrition, v.38, p.497-508, 2015.

Capra, A.; Scicolone, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. Journal of Agricultural Engineering Research, v.70, p.355-365, 1998.

Carmo, C. A. F. S.; Araújo, W. S.; Bernardi, A. C. C.; Saldanha, M. F. C. Métodos de análise de tecidos vegetais utilizados na Embrapa Solos. Circular técnica, 6. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2000. 41p.

Ceará. Resolução COEMA Nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 21 de fevereiro de 2017. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 2017.

Chakrabarty, B.; Ghoshaland A. K.; Purkait, M. K. Ultra filtration of stable oil-in-water emulsion by polysulfone membrane. Journal of Membrane Science, v.325, p.427-437, 2008.

Chaves, L. H. G.; Souza, R. S. Fitoextração de cobre e zinco em um Neossolo Quartizarênico contaminado com metais pesados. Comunicata Scientiae, v.6, p.396-403, 2015.

Chen, C.; Huang, D.; Liu, J. Functions and toxicity of nickel in plants: recent advances and future prospects. Clean: Soil, Air, Water, v.37, p.304-313, 2009.

Coelho, D. C. L. Atributos químicos de um argissolo e produção de capim elefante decorrentes da aplicação de percolado de aterro sanitário. Mossoró: UFERSA, 2013. 100p. Dissertação Mestrado

Consoli, S.; Inglese, G.; Inglese, P. Determination of Evapotranspiration and Annual Biomass Productivity of a Cactus Pear [*Opuntia ficus indica* L. (Mill.)] Orchard in a Semiarid Environment. Journal of irrigation and drainage engineering. v.139, p.680-890, 2013.

Corrente, J. E.; Nogueira, M. C. S.; Costa, B. M. Contrastes ortogonais na análise do controle de volatilização de amônia em compostagem. Scientia Agricola, v.58, p.407-412, 2001.

Costa, A. G. Utilização de efluente de laticínios na produção do mandacaru sem espinho (*Cereus hildmannianus* K. Schum) no semiárido brasileiro. Mossoró: UFERSA, 2017. 86p. Dissertação Mestrado

Costa, F. G. B. Produção e capacidade de fitoextração do girassol (*Heliantus annus*) irrigado com água produzida. Mossoró: UFERSA, 2018. 92p. TeseDoutorado

Costa, F. G. B.; Batista, R. O.; Pereira, J. O.; Ferreira Neto, M.; Alves, S. M. C.; Simões, W. L.; Souza, L.; Pordeus, R. V. Productive and morphogenetic characteristics of sunflower irrigated with domestic treated wastewater on northeast semiarid area. Australian Journal of Crop Science, v. 12, p. 1184-1190, 2018.

Costa, N. L.; Gianluppi, V.; Moraes, A. Produtividade de forragem e morfogênese de *Trachypogon vestitus*, durante o período seco, em área de cerrado, Roraima. Revista Trópica – Ciências Agrárias e Biológicas, v.6, p.93-103, 2012.

Coutinho, H. D.; Barbosa, A. R. Fitorremediação: Considerações gerais e características de utilização. Silva Lusitana, v.15, p.103-107, 2007.

Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Miranda, F. R.; Aragão, F. A. S.; Oliveira, M. E. B. Irrigação com água produzida: efeitos sobre características do solo e a produção do girassol. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 35p.

Cunha, K. P.V.; Nascimento, C. W. A.; Pimentel, R. M. M.; Accioly, A. M. A.; Silva, A. J. Disponibilidade, acúmulo e toxidez de cádmio e zinco em milho cultivado em solo contaminado. RevistaBrasileira de Ciência do Solo, v.32, p.1319-1328, 2008.

Davidson, D. J.; Andrews, J.; Pauly, D. The effort factor: Evaluating the increasing marginal impact of resource extraction over time. Global Environmental Change, v.25, p.63-68, 2014.

Donato, P. E. R.; Pires, A. J. V.; Donato, S. L. R.; Bonomo, P.; Silva, J. A.; Aquino, A. A. Morfometria e rendimento da palma forrageira 'Gigante' sob diferentes espaçamentos e doses de adubação orgânica. Revista Brasileira de Ciências Agrárias. v.9, p.151-158, 2014.

Doorenbos, J.; Pruitt, W. O. Guidelines for predicting crop water requirements. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

Drioli, E.; Ali, A.; Lee, Y. M.; Al-Sharif, S. F.; Al-Beirute, M.; Macedonio, F. Membrane operations for produced water treatment. Desalination and Water Treatment, v.57, p. 14317-14335, 2016.

Duarte, S. A.; Airoldi, R. P. S.; Folegatti, M. V.; Botrel, T. A.; Soares, T. M. Efeitos da aplicação de efluente tratado no solo: pH, matéria orgânica, fósforo e potássio. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, Campina Grande, v.12, p.302-310, 2008.

Ekperusi, A. O.; Sikoki, F. D.; Nwachukwu, E. O. Application of common duckweed (Lemna minor) in phytoremediation of chemicals in the environment: State and future perspective. Chemosphere, v.223, p.285-309, 2019.

Elfanssi, S.; Ouazzani, N.; Mandi, L. Soil properties and agro-physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa* L.) irrigated by treated domestic wastewater. Agricultural Water Management, v.201, p.231-240, 2018.

Ent, A. van der; Baker, A. J. M.; Reeves, R. D.; Pollard, A. J.; Schat, H. Hyperaccumulators of metal and metalloid trace elements: facts and fiction. Plant and Soil, v.362, p.319-334, 2013.

Epstein, E.; Bloom, A. J. Mineral Nutrition of Plants: Principles and Perspectives, Second Edition Sinauer Associates, Inc. Sunderland, Massachusetts, 2005. Cap. 4, 5 e 6.

Fageria, N. K. Tolerance of rice cultivar to salinity. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.26, p.281-288, 1991.

Fakhru'l-Razi, A.; Pendashteh, A.; Abdullah, L. C.; Biak, D. R. A.; Madaeni, S. S.; Abidin, Z. Z. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. Journal of Hazardous Materials, v.170, p.530-551, 2009.

Farag, A. M.; Harper, D. D. A review of environmental impacts of salts from produced water on aquatic resources. International Journal of Coal Geology, v.126, p.157-161, 2014.

Fayiga, A. O.; Ma, L. Q. Using phosphate rock to immobilize metals in soil and increase arsenic uptake by hyperaccumulator Pteris vittata. Science ofthe Total Environment, v. 359, p. 17-25, 2006.

Fernandes, M. S. Nutrição mineral de plantas. Viçosa: SBCS, 2006. 432.

Ferreira, A. K. C. Avaliação de métodos de análises químicas de nutrientes em tecido vegetal. Mossoró: UFERSA, 2014a. 88p. Tese Doutorado

Ferreira, D. F. Sisvar: A Guide for its Bootstrap procedures in multiple comparisons. Ciência e Agrotecnologia, v.38, p.109-112, 2014b.

Ferreira, P. A.; Ruiz, H. A. Transporte de solutos no solo. Viçosa – MG: UFV, 2007. 30p.

Furlani, A. M. C. Nutrição mineral. In: Kerbauy, G. B. Fisiologia vegetal. Rio de Janeiro, Guanabara Koogan, 2004. p.40-75.

Garbisu, C.; Alkorta, I. Phytoextraction: a cost effective plant-based technology for the removal of metals from the environmental. Bioresource Technology, v.77, p.229-236, 2001.

Gauglhofer, J. Environmental aspects of tanning with chromium. Journal of the Society of Leather Technologists and Chemists, v.70, p.11, 1985.

Gomes, A. P. P. Gestão ambiental da água produzida na indústria de petróleo: melhores práticas e experiências internacionais. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014. 120p. Dissertação Mestrado

Guo, T. R.; Ping, Z. G.; Zhang, Y. H. Physiological changes in barley plants under combined toxicity of aluminum, copper and cadmium. Colloid and Surfaces B: Biointerfaces, v.57, p.182-188, 2007.

Gupta, D. K.; Huang, H. G.; Corpas, F. J. Lead tolerance in plants: strategies for phytoremediation. Environmental Science and Pollution Research, v.20, p.2150-2161, 2013.

Haynes, R. J. Lime and phosphate in the soil-plant system. Advances in Agronomy, v. 37, p.249-315, 1984.

Heenan, D. P.; Campbell, L. C. Transport and distribution of manganese in two cultivars of soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). Australian Journal of Agricultural Research, v.31, p.943-949, 1980.

Heidarpour, M.; Mostafazadeh-Fard, B.; Koupai, J.A.; Malekian, R. The effects of treated wastewater on soil chemical properties using subsurface and surface irrigation methods. Agricultural Water Management, v.90, p.87-94, 2007.

Hernandez-Perez, A. Economics of oil regulation and the Brazilian reform: Some issues. Energy Policy, v.39, p.57-65, 2011.

Holanda Filho, R. S. F.; Santos, D. B.; Azevedo, C. A. V.; Coelho, E. F.; Lima, V. L. A. Água salina nos atributos químicos do solo e no estado nutricional da mandioqueira. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.60-66, 2011.

Hopkins, W. G.; Hüner, N. P. A. Introduction to plant physiology. 4.ed. NewnYork: John Wiley & Sons, 2009. 528p.

Horst, W. J.; Marschner, H. Einfluss von Silizium auf den Bindungszustand von Mangan im Blattgewebe von Bohnen (*Phaseolus vulgaris*). Journal of plant nutrition and soil science, v.141, p.487-497, 1978.

Hosseini, A.; Brown, J. E.; Gwinn, J. P.; Dowdall, M. Review of research on impacts to biota of discharges of naturally occurring radionuclides in produced water to the marine environment. Science of the Total Environment, v.438, p.325-333, 2012.

Igunnu, E. T.; Chen, G. Z. Produced water treatment technologies. International Journal of Low-Carbon Technologies v.9, p.157-177, 2012.

Instituto de Defesa e Inspeção Agropecuária do Rio Grande do Norte - IDIARN. Implantação de bancos de sementes da cultura da palma forrageira no Estado do Rio Grande do Norte, visando à distribuição, divulgação e inovação, utilizando variedades resistentes à Cochonilha do Carmim (*Dactylopius opuntiae*). Natal - IDIARN, 2013. 20p.

Instituto Nacional do Semiárido (INSA). Relatório da Oficina Estratégias de Segurança Forrageira no Semi-Árido. Campina grande: INSA, 2016. 34p.

Jabeen, R.; Ahmad, A.; Iqbal, M. Phytoremediation of heavy metals: physiological and molecular mechanisms. The Botanical Review, v.75, p.339-364, 2009.

Jeong, H.; Jang, T.; Seong, C.; Park, S. Assessing nitrogen fertilizer rates and split applications using the DSSAT model for rice irrigated with urban wastewater. Agricultural Water Management. v.141, p.1-9, 2014.

Judd, S.; Qiblawey, H.; Al-Marri, M.; Clarkin, C.; Watson, S.; Ahmed, A.; Bach, S. The size and performance of offshore produced water oil-removal technologies for reinjection. Separation and Purification Technology, v.134, p.241-246, 2014.

Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soil and plants. Boca Raton, CRC Press, 1985. 315p.

Kabata-Pendias, A.; Pendias, H. Trace elements in soil and plants, 3 ed. Boca Raton, CRC Press, 2001. 331p.

Kacalkova, L.; Tlustoa, P.; Szakova, J. Phytoextraction of risk elements by willow and poplar trees. International Journal of Phytoremediation, v.17, p.414-421, 2015.

Kaur, G.; Mandal, A. K.; Nihlani, M. C.; Lal, B. Control of sulfidogenic bacteria in produced water from the Kathloni oilfield in northeast India. International Biodeterioration & Biodegradation, v.63, p.151-155, 2009.

Khurana, M. P. S.; Singh, P. Waste water use in crop production: a review. Resources and Environment, v.2, p.116-131, 2012.

Koh, I.; Chen-Hamacher, X.; Hicke, K.; Thiemann, W. Leachate treatment by the combination of photochemical oxidation with biological process. Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry, v.162, p.261-271, 2004.

Kovácik, J.; Dresler, S.; Wójciak-Kosior, M.; Hladký, J.; Babula, P. Metabolic changes induced by manganese in chamomile. Plant Physiology and Biochemistry, v.133, p.127-133, 2018.

Krämer, U. Metal hyperaccumulation in plants. Annual Review of Plant Biology, v.61, p.517-34, 2010.

Küpper, H.; Andresen, E. Mechanisms of metal toxicity in plants. Metallomics, v.8, p.269-285, 2016.

Leite, M. L. M. V.; Silva, D. S.; Andrade, A. P.; Pereira, W. E.; Ramos, J. P. F. Caracterização da produção de palma forrageira no Cariri paraibano. Revista Caatinga, v.27, p.192-200, 2014.

Lemos, M. Uso de esgoto doméstico tratado na produção de palma forrageira em assentamento rural do semiárido brasileiro. Mossoró: UFERSA, 2016. 244p. Tese Doutorado

Léon, S. G.; Cavallini, J. M. Tratamento e uso de águas residuárias. Campina Grande: UFPB, 1999. 110p.

Li, N.; Guo, B.; Li, H.; Fu, Q.; Feng, R.; Ding, Y. Effects of double harvesting on heavy metal uptake by six forage species and the potential for phytoextraction in field. Pedosphere, v.26, p.717-724, 2016.

Lima, C. V. S.; Meurer, E. J. Elementos-traço no solo, nas águas e nas plantas de uma lavoura de arroz irrigado do Rio Grande do Sul. Revista de estudos ambientais (Online) v.15, p.20-30, 2013.

Lima, G. F. C.; Rego, M. M. T.; Dantas, F. D. G.; Lôbo, R. N. B.; Silva, J. G. M.; Aguiar, E. M. Morphological characteristics and forage productivity of irrigated cactus pear under different cutting intensities. Revista Caatinga, v.29, p.481-488, 2016.

Lima, C. V. S.; Meurer, E. J.; Schmidt, R. O.; Souza, E. D. Potencial de fitoextração do nabo forrageiro e da aveia preta em Argissolo contaminado por cádmio. Revista de Estudos Ambientais, v.12, p.39-49, 2010a.

Lima, G. F. C.; Silva, J. G. M.; Aguiar, E. M.; Teles, M. M. Reservas forrageiras estratégicas para a pecuária familiar no semiárido: palma, fenos e silagem. Natal, RN: EMPARN, 2010b. v.8, 53p.

Lima, G. F. C.; Wanderley, A. M.; Guedes, F. X.; Rego, M. M. T.; Dantas, F. D. G.; Silva, J. G. M.; Novaes, L. P.; Aguiar, E. M. Palma Forrageira irrigada e adensada: uma reserva forrageira estratégica para o Semiárido Potiguar. (EMPARN Documentos, 45). Parnamirim, EMPARN, 2015. 62p.

Liu, K.; Lv, J.; He, W.; Zhang, H.; Cao, Y.; Dai, Y. Major factors influencing cadmium uptake from the soil into wheat plants. Ecotoxicology and Environmental Safety, v.113, p.207-213, 2015.

Lombi, E.; Zhao, F. J.; Mcgrath, S. P.; Young, S. D.; Sacchi, G. A. Physiological evidence for a high-affinity cadmium transporter highly expressed in a *Thlaspi caerulescens* ecotype. New Phytologist, v.149, p.53-60, 2001.

Lopes, D. N. Influência do calcário, fósforo e micronutrientes na mineralização da matéria orgânica e características físico-químicas de material de três solos de Altamira (Pará). Viçosa: UFV, 1977. 104 p. Tese Doutorado

Lopes, E. D. O. R.; Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Mattos, E. P. N. B. Short-term effects of produced water on microbial activity in semiarid soil. International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences, v.3, p.395-403, 2014.

Ma, L. Q.; Komar, K. M.; Tu, C.; Zhang, W.; Cai, Y.; Kenelley, E. D. A fern that hyperaccumulates arsenic. Nature, v.409, p.579, 2001.

Malavolta, E. Manual de nutrição de plantas. São Paulo, Agronômica Ceres, 2006. 638p.

Malavolta, E. Potássio, Mg e S nos solos e culturas brasileiras. Piracicaba, Instituto da Potassa & Fosfato, 1979. 92p. (Boletim Técnico, 4).

Malavolta, E.; Vitti, G. C.; Oliveira, S. A. Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações. 2. ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319 p.

Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palartti, L. F. Irrigação: princípios e métodos. Viçosa: UFV, 2006. 328 p.

Mantovani E. C.; Costa L. C. Manejo integrado das culturas e dos recursos hídricos. Workshop internacional sobre manejo integrado das culturas e dos recursos hídricos. Brasília: SRH/MMA-DEA-UFV, 1998. 154p.

Marenco, R. A.; Lopes, N. F. Fisiologia vegetal: fotossíntese, respiração, relações hídricas e nutrição vegetal. 3. ed. Viçosa: UFV, 2013. 486p.

Marques, M. R. C.; Souza, P. S. A.; Rigo, M. M.; Cerqueira, A. A.; Paiva, J. L.; Merçon, F.; Perez, D. V. Effects of untreated and treated oilfield-produced water on seed germination,

seedling development, and biomass production of sunflower (*Helianthus annuus* L.). Environmental Science and Pollution Research, v.22, p.15985-15993, 2015.

Marques, O. F. C.; Gomes, L. S. P.; Mourthé, M. H. F.; Braz, T. G. S.; Neto, O. S. P. Palma forrageira: cultivo e utilização na alimentação de bovinos. Caderno de Ciências Agrárias. v.9, p.75-93, 2017.

Marschner, H. Mineral nutrition of higher plants. 2.ed. London, Academic Press, 1995. 889p.

Marschner, H.; Römheld, V. Strategies of plant for acquisition of iron. Plant and Soil, v.165, p.261-274, 1994.

Martin, J. D.; Carlesso, R.; Aires, N. P.; Gatto, J. C.; Dubou, U.; Fries, H. M.; Schueibler, R. B. Irrigação deficitária para aumentar a produtividade da água na produção de silagem de milho. Irriga, Edição Especial, p.192-205, 2012.

Matos, A. T. Qualidade do meio físico ambiental: práticas de laboratório. Viçosa: UFV, 2012. 150p.

Mavi, M. S.; Marschner, P.; Chittleborough, D. J.; Cox, J. W.; Sanderman, J. Salinity and sodicity affect soil respiration and dissolved organic matter dynamics differentially in soils varying in texture. Soil Biology and Biochemistry, v.45, p.8-13, 2012.

Medeiros, S. S.; Perez-Marin, A. M.; Santos Júnior, J. A.; Reis, C. F.; Gheyi, H. R. Potencial hídrico-nutricional da água residuária de suinocultura na irrigação do algodoeiro cultivado em condições semiáridas. Irriga, v.20, p.248-260, 2015.

Meeûs, C.; Eduljee, G. H.; Hutton, M. Assessment and management of risks arising from exposure to cadmium in fertilizers. Science of The Total Environment, v.291, p.167-187, 2002.

Meneses, A. C. A. M.; Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Andrade, D. J. Biological soil attributes in oilseed crops irrigated with oilfield produced water in the semi-arid region. Revista Ciência Agronômica, v.48, p.231-241, 2017.

Milner, M. J.; Kochian, L. V. Investigating heavy-metal hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a model system. Annals of Botany, v.102, p.3-13, 2008.

Miranda, F. R. de; Crisostomo L. A.; Weber, O. B.; Barbosa, F. L.; Aragao, F. A. S. de; Oliveira, M. E. B. de. Irrigação com água produzida na extração de petróleo: efeitos sobre a salinidade do solo e a produtividade da mamoneira. Fortaleza: Embrapa Agroindústria Tropical, 2016. 29p.

Morais, J. M. Petróleo em águas profundas – Uma história tecnológica da Petrobras na exploração e produção *offshore*. IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Petrobras, Brasília, 2013. 424p.

Morugán-Coronado, A.; García-Orenes, F.; Mataix-Solera, J.; ArE. Cnegui, V.; Mataix-Beneyto, J. Short-term effects of treated wastewater irrigation on Mediterranean sunflower seedlings and analysis of their stress factors. Environmental and Experimental Botany, v.54, p.8-21, 2011.

Motta, A. R. P.; Borges, C. P.; Kiperstok, A.; Esquerre, K. P.; Araújo, P. M.; Branco, L. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.18, p.15-26, 2013.

Munirasu, S.; Haija, M. A.; Banat, F. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment – A review. Process Safety and Environmental Protection, v.100, p.183-202, 2016.

Nascimento, T. S.; Monteiro, R. N. F.; Sales, M. A. L.; Floriano, L. S.; Pereira, A. I. A. Irrigação com efluente de piscicultura no cultivo de mudas de tomate. Revista Brasileira de Agricultura Irrigada, v.10, p.866-874, 2016.

Nathan, O.; Njeri, K. P.; Rang'Ondi, O. E.; Sarima, C. J. The potential of *Zea mays, Commelina bengelensis, Helianthus annuus* and *Amaranthus hybridus* for phytoremediation of wastewater. Revista Ambiente & Água, v.7, p.51-60, 2012.

Neal, J. S.; Fulkerson, W. J.; Sutton, B. G. Differences in water use efficiency among perennial forages used by the dairy industry under optimum and deficit irrigation. Irrigation Science, v.29, p.213-232, 2011.

Neder, D. G.; Costa, F. R.; Edvan, R. L.; Souto Filho, L. T. Correlations and path analysis of morphological and yield traits of cactus pear accessions. Crop Breeding and Applied Biotechnology, v.13, p.203-207, 2013.

Neff, J.; Lee, K.; DeBlois, E. M. Produced water: Overview of composition, fates and effects. In: Lee, K.; Neff, J. Produced water, environmental risks and advances inmitigation technologies. Springer Science, 2011. Cap.1, 608p.

Neves, A. L. A.; Pereira, L. G. R.; Santos, R. D.; Voltolini, T. V.; Araujo, G. G. L.; Moraes, S. A.; Aragão, A. S. L.; Costa, C. T. F. Plantio e uso da palma forrageira na alimentação de bovinos leiteiros no semiárido brasileiro. Juiz de Fora, MG: Embrapa Gado Leiteiro, 2010. 7p. (Embrapa Gado Leiteiro. Comunicado Técnico, 62).

Noulas, C.; Tziouvalekas, M.; Karyotis, T. Zinc in soils, water and food crops. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, v.49, p.252-260, 2018.

Novais, R. F.; Alvarez, V. V. H.; Barros, N. F.; Fontes, R. L. F.; Cantarutti, R. B.; Neves, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: SBCS, 2007. 1017p.

Novais, R. F.; Neves, J. C. L.; Barros, N. F.; Sediyama, T. Deficiência de manganês em plantas de soja cultivadas em solos de cerrado. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.13, p.199-204, 2007.

Novais, R. F; Smyth, T. J. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: UFV, 1999. 399 p.

Oliveira, D. Q. L.; Carvalho, K. T. G.; Bastos, A. R. R.; Oliveira, L. C. A.; Marques, J. J. G. S. M.; Nascimento, R. S. M. P. Utilização de resíduos da indústria de couro como fonte nitrogenada para o capim-elefante. Revista Brasileira de Ciências do Solo, v.32, p.417-424, 2008.

Oliveira, E. A.; Junqueira, S. F.; Mascarenhas, R. J. Caracterização físico-química e nutricional do fruto da palma (*Opuntia ficus indica* L. Mill) cultivada no sertão do sub-médio São Francisco. Holos, v.3, 2011.

Oliveira, R. A.; Daros, E.; Zambon, J. L. C.; Weber, H.; Ido, O. T.; Bespalhok-Filho, J. C.; Zuffellato-Ribas, K. C.; Silva, D. K. T. Área foliar em três cultivares de cana-de-açúcar e sua correlação com a produção de biomassa. Pesquisa Agropecuária Tropical, v.37, p.71-76, 2007.

Olsson, O.; Weichgrebe, D.; Rosenwinkel, K. H. Hydraulic fracturing wastewater in Germany: composition, treatment, concerns. Environmental Earth Sciences, v.70, p.3895-3906, 2013.

Padmavathiamma, P. K.; Li, L. Y. Phytoremediation technology: hyper-accumulation metals in plants. Water, Air and Soil Pollution, v.184, p.105-126, 2007.

Pereira, A. R. Balanço hídrico para irrigação de precisão aplicada em pomares. Campinas: FUNDAG, 2011. 90p.

Pereira, B. F. F.; He, Z. L.; Silva, M. S.; Herpina, U.; Nogueira, S. F.; Montese, C. R.; Melfif, A. J. Reclaimed wastewater: Impact on soil-plant system under tropical conditions. Journal of Hazardous Materials, v.192, p.54-61, 2011.

Pica, N. E.; Carlson, K.; Steiner, J. J.; Waskom, R. Produced water reuse for irrigation of non-food biofuel crops: Effects on switchgrass and rapeseed germination, physiology and biomass yield. Industrial Crops and Products, v.100, p.65-76, 2017.

Pierangeli, M. A. P.; Guilherme, L. R. G.; Curi, N.; Costa, E. T. S.; Lima, J. M.; Marques, J. J. G. S. M.; Figueiredo, L. F. P. Comportamento sortivo, individual e competitivo, de metais pesados em Latossolos com mineralogia contrastante. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.31, p.819-826, 2007.

Pietrini, F.; Zacchini, M.; Pietrosanti, L.; Ferretti, M.; Massacci, A. Spatial distribution of cadmium in leaves and on photosynthesis: examples of different strategies in willow and poplar clones. Plant Biology, v.12, p. 355-363, 2010.

Pinheiro, K. M.; Silva, T. G. F.; Carvalho, H. F. S.; Santos, J. E. O.; Morais, J. E. F.; Zolnier, S.; Santos, D. C. Correlações do índice de área do cladódio com características morfogênicas e produtivas da palma forrageira. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.49, p.939-947, 2014a.

Pinheiro, R.; Travalloni, A. M.; Melo Júnior, G.; Crisostomo, L. A.; Aquino, O.; Orlando, A. E. IBP 1010_14 Projeto piloto de irrigação com água produzida no Campo de Fazenda Belém. Rio Oil & Gas Expo and Conference, 2014b.

Plauborg, F.; Andersen, M. N.; Liu, F.; Ensin, J. K.; Ragab, R. Safe and high quality food production using low quality waters and improved irrigation systems and management: SAFIR. Agricultural Water Management, v.98, p.377-384, 2010.

Pocknee, S.; Summer, M. E. Cation and nitrogen contents of organic matter determine its soil liming potential. Soil Science Society of America Journal, v.61, p.86-92, 1997.

Portella, A. Y.; Fabianovicz, R. Bacia potiguar: sumário geológico e setores em oferta. Brasil, 14ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás – ANP. (2017). Disponível em: <http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/Round14/Mapas/sumarios/Sumario_Geologico_R14_Potiguar.pdf > Acesso em: 11 de dez. 2018.

Prado, R. M. Manual de nutrição de plantas forrageiras. Jaboticabal: FUNESP, 2008. 500p.

Preston, W.; Nascimento, C. W. A.; Biondi, C. M.; Souza Junior, V. S.; Silva, W. R.; Ferreira, H. A. Valores de referência de qualidade para metais pesados em solos do Rio Grande do Norte. Revista Brasileira de Ciência do Solo, v.38, p.1028-1037, 2014.

Prior, M.; Sampaio, S. C.; Nóbrega, L. H. P.; Dieter, J.; Costa, M. S. S. M. Efeitos na cultura do milho e no solo devido a aplicação de água residuária de suinocultura associada com adubação química. Engenharia Agrícola, v.35, p.744-755, 2015.

Qiao, X.; Zhang, Z.; Yu, J.; Ye, X. Performance characteristics of a hybrid membrane pilot-scale plant for oilfield-produced wastewater. Desalination, v.225, p.113-122, 2008.

Queiroz, M. G.; Silva, T. G. F.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S.; Lima, L. R.; Alves, J. O. Características morfofisiológicas e produtividade da palma forrageira em diferentes lâminas de irrigação. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.19, p.931-938, 2015.

Queiroz, M. G.; Silva, T. G. R.; Zolnier, S.; Silva, S. M. S; Souza, C. A. A.; Carvalho, H. F. S. Relações hídrico-econômicas da palma forrageira cultivada em ambiente semiárido. Irriga, v.1, p.141-154, 2016.

Rêgo, L. G. S.; Martins, C. M.; Silva, E. F.; Silva, J. J. A.; Lima, R. N. S. Pedogenesis and soil classification of an experimental farm in Mossoró, state of Rio Grande do Norte, Brazil. Revista Caatinga, v.29, p.1036-1042, 2016.

Rego, M. M. T.; Lima, G. F. C.; Silva, J. G. M.; Guedes, F. X.; Dantas, F. D. G.; Lôbo, R. N. B. Morfologia e rendimento de biomassa da palma Miúda irrigada sob doses de adubação orgânica e intensidades de corte. Revista Científica de Produção Animal, v.16, p.118-130, 2014.

Reisenauer, H. M. Determination of plant-available soil manganese. In: Graham, R. D.; Hannam, R. J.; Uren, N. C. Manganese in soil and plants. Dordrecht, Kluwer Academic Publisher, 1988, p.87-98.

Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (Ed.). Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359p.

Rice, E. W.; Baird, R. B.; Clesceri, A. D. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2012. 1496p.

Richards, L. A. Diagnosis improvements of saline and alkaline soils. Washington: Departament of Agriculture, 1954. 160p.

Rosen, C. J.; Eliason, R. Nutrient Management for Commercial Fruit and Vegetable Crops in Minnesota. University of Minnesota. Extension Service, BU-05886, 2005.

Sampaio, S. C.; Fiori, M. G. S.; Opazo, M. A. U.; Nóbrega, L. H. P. Comportamento das formas de nitrogênio em solo cultivado com milho irrigado com água residuária da suinocultura. Engenharia Agrícola, v.30, p.138-149, 2010.

Sandri, D.; Rosa, R. R. B. Atributos químicos do solo irrigado com efluente de esgoto tratado, fertirrigação convencional e água de poço. Irriga, v.22, p.18-33, 2017.

Santos, D. C.; Farias, I.; Lira, M. A.; Santos, M. V. F.; Arruda, G. P.; Coelho, R. S. B.; Dias, F. M.; Melo, J. N. Manejo e utilização da palma forrageira (*Opuntia* e *Nopalea)* em Pernambuco. Recife: IPA, 2006. (Documentos, 30).

Santos, E. V.; Bezerra Rocha, J. H.; Araújo, D. M.; Moura, D. C.; Martínez-Huitle, C. A. Decontamination of produced water containing pretoleum hydrocarbons by electrochemical methods: A minireview. Environmental Science and Pollution Research. v.21, p.8432-8441, 2014.

Santos, M. V. F.; Lira, M. A.; Dubeux Júnior, J. C. B.; Ferreira, M. A.; Cunha, M. V. Palma forrageira. In: Fonseca, D. M.; Martuscello, J. A. Plantas forrageiras. Viçosa, MG: UFV, 2010. Cap.14, p.459-493.

Santos, P. R.; Ruiz, H. A.; Neves, J. C. L.; Freire, M. B. G. S.; Freire, F. J. Acúmulo de cátions em dois cultivares de feijoeiro crescidos em soluções salinas. Revista Ceres, v.56, p.666-678, 2009.

Shahid, M.; Pinelli, E.; Dumat, C. Review of Pb availability and toxicity to plants in relation with metal speciation; role of synthetic and natural organic ligands. Journal of Hazardous Materials, v.1, p.1-12, 2012.

Sharma P.; Dubey R. S. Lead toxicity in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, v.17, p.17-35, 2005.

Sheng, J. J. Modern Chemical Enhanced Oil Recovery: Theory and Practice, Gulf Professional Publishing, Burlington, 2011.

Shikhova, N. S. Some regularities in the accumulation of lead in urban plants (by example of Vladivostok). Contemporary Problems of Ecology, v.5, p.285-294, 2012.

Siebert, S.; Burke, J.; Fauers, J. M.; Frenken, K.; Hoogeveen, J.; Doll, P.; Portmann, F. T. Groundwater use for irrigation – a global inventory. Hydrologyand Earth System Sciences, v.14, p.1863-1880, 2010.

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

Silva, I. N.; Fontes, L. O.; Tarvella, L. B.; Oliveira, J. B.; Oliveira, A. C. Qualidade de água na irrigação. Agropecuária Científica no Semi-Árido, v.7, p.01-15, 2011.

Silva, J. B. G.; Martinez, M. A.; Pires, C. S.; Andrade, I. P. S.; Silva, G. T. Avaliação da condutividade elétrica e ph da solução do solo em uma área fertirrigada com água residuária de bovinocultura de leite. Irriga, edição especial, p.250-263, 2012.

Silva, L. M.; Fagundes, J. L.; Viegas, P. A. A.; Muniz, E. N.; Rangel, J. H. A.; Moreira, A. L.; Backes, A. A. Produtividade da palma forrageira cultivada em diferentes densidades de plantio. Ciência Rural, v.44, p.2064-2071, 2014.

Silva, N. G. M. E; Lira, M. A.; Santos, M. V. F.; Dubeux Júnior, J. C. B.; Mello, A. C. L.; Silva, M. C. Relação entre características morfológicas e produtivas de clones de palma-forrageira. Revista Brasileira de Zootecnia, v.39, p.2389-2397, 2010.

Silva, R. R.; Sampaio, E. V. S. B. Palmas forrageiras *Opuntia ficus-indica* e *Nopalea cochenillifera*: sistemas de produção e usos. Revista Geama, v.1, p.151-156, 2015.

Silva, T. G. F; Araújo Primo, J. T.; Morais, J. E. F.; Diniz, W. J. S.; Souza, C. A. A.; Silva, M. C. Crescimento e produtividade de clones de palma forrageira no semiárido e relações com variáveis meteorológicas. Revista Caatinga, v.28, p.10-18, 2015.

Siqueira-Silva, A. I. Silva, L. C.; Azevedo, A. A.; Oliva, M. A. Iron plaque formation and morphoanatomy of roots from species of resting subjected to excess iron. Ecotoxicology and Environmental Safety, v. 78, p. 265-275, 2012.

Skalak, K. J.; Engle, M. A.; Rowan, E. L.; Jolly, G. D.; Conko, K. M.; Benthem, A. J.; Kraemer, T. F. Surface disposal of produced waters in western and southwestern Pennsylvania: Potential for accumulation of alkali-earth elements in sediments. International Journal of Coal Geology, v.126, p.162-170, 2014.

Sou/Dakouré, M. Y.; Mermoud, A.; Yacouba H.; Boivin, P. Impacts of irrigation with industrial treated wastewater on soil properties. Geoderma, v.200-201, p.31-39, 2013.

Sousa, A. F. Mineralização de nutrientes e crescimento de plantas em solos irrigados com águas residuais da extração de petróleo. Fortaleza: UFC, 2016. 73p. Tese Doutorado

Sousa, A. F.; Crisóstomo, L. A.; Weber, O. B.; Escobar, M. E. O.; Oliveira, T. S. Nutrient contente in sunflowers irrigated with oil exploration water. Revista Caatinga, v.29, p.94-100, 2016.

Sousa, A. F.; Weber, O. B.; Crisostomo, L. A.; Escobar, M. E. O.; Oliveira, T. S. Changes in soil soluble salts and plant growth in a sandy soil irrigated with treated water from oil extraction. Agricultural Water Management, v.193, p.13-21, 2017.

Souza, E. R.; Freire, M. B. G.; Nascimento, C. W. A.; Montenegro, A. A. A.; Freire, F. J.; Melo, H. F. Fitoextração de sais pela *Atriplex nummularia* lindl. sob estresse hídrico em solo salino sódico. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.15, p.477-483, 2011.

Souza, R. S.; Chaves, L. H. G.; Fernandes, J. D. Adsorção de zinco e sua relação com características de solos do Estado da Paraíba. Revista Brasileira de Ciências Agrárias, v.1, p.1-6, 2006.

SPE. Challenges in reusing produced water: SPE white paper. Society of Petroleum Engineers, p.1-6, 2011. Disponível em: http://www.spe.org/industry/challenges-in-reusing-produced-water.php(Acessado em: 18 Abr. de 2018).

Stanic, J. Unconventional oil and gas production drives trends in water management and treatment. Global Water Intelligence, v.3, p.10-15, 2014.

Stanin, F. T. The transport and fate of chromium (VI) in the environment. In: Guertin, J.; Jacobs, J. A.; Avakian, C. P. Chromium (VI) handbook. CRC, Boca Raton, FL, 2005. Cap.5, p.161-211.

Stewart, M.; Arnold, K. Produced water treatment systems: Part 1. In: Produced water treatment field manual. [S.l.: s.n.], 2011. p.1-134.

Taiz, L.; Zeiger, E. Fisiologia vegetal. 5.ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 918p.

Taiz, L.; Zeiger, E.; Møller, I. M.; Murphy, A. Fisiologia e desenvolvimento vegetal. 6ª ed. Porto Alegre: Artmed, 2017. 858p.

Tavakoli, A. R.; Mahdavi-Moghadam, M. Path analysis, drought tolerances and yield components for wheat under deficit irrigation and nitrogen levels. International Journal of Agriculture: Researchand Review, v.3, p.281-291, 2013.

Tavares, S. R. L.; Oliveira, S. S.; Salgado, C. M. Avaliação de espécies vegetais na fitorremediação de solos contaminados por metais pesados. Holos, v.5, p.80-97, 2013.

Teixeira, P. C.; Donagemma G. K.; Wenceslau, A. F.; Teixeira, G. Manual de métodos de análise de solo. 3.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017. 573 p.

Tomasi, N.; Kretzschmar, T.; Espen, L.; Weisskopf, L.; Fuglsang, A.T.; Palmgren, M.G.; Neumann, G.; Varanini, Z.; Pinton, R.; Martinoia, E.; Cesco, S. Plasma membrane H^+-ATPase-dependent citrate exudation from cluster roots of phosphate-deficient white lupin. Plant, Cell & Environment, v.32, p.465-475, 2009.

Urbano, V. R.; Mendonça, T. G.; Bastos, R. G.; Souza, C. F. Effects of treated wastewater irrigation on soil properties and lettuce yield. Agricultural Water Management, v.181, p.108-115, 2017.

Urbano, V. R.; Mendonça, T. G.; Bastos, R. G.; Souza, C. F. Physical-chemical effects of irrigation with treated wastewater on Dusky Red Latosol soil. Revista Ambiente & Água, v.10, p.737-747, 2015.

Vale, M. B.; Azevedo, P. D. Avaliação da produtividade e utilidade do capim elefante e do sorgo irrigados com água do lençol freático e do rejeito do dessalinizador. Holos, v.3, p.181-195, 2013.

Vasconcelos, A. G. V.; Lira, M. A.; Cavalcanti, V. L. B.; Santos, M. V. F.; Willadino, L. Seleção de clones de palma forrageira resistentes à cochonilha-do-carmim (*Dactylopius* sp.). Revista Brasileira de Zootecnia, v.38, p.827-831, 2009.

Vendruscolo, D.; Santana, N. A.; Souto, K. M.; Ferreira, P. A. A.; Melo, G. W. B.; Jacques, R. J. S. Comportamento diferencial das culturas de cobertura de verão na absorção e translocação de cobre. Ciência Rural, v.48, e20180005, 2018.

Viana, A. P.; Bruckner, C. H.; Martinez, H.E.P.; Huaman, C. A. M.; Mosquim, P. R. Teores de Na, K, Mg e Ca em porta-enxertos de videira em solução salina. ScientiaAgricola, v.58, p.187-191, 2001.

Vieira, V. M. Modelo de avaliação do gerenciamento da água produzida em operações de produção de petróleo e gás natural em bacias terrestres brasileiras. Bahia: UFBA, 2016. 154p. Tese Doutorado

Weber, O. B.; Crisóstomo, L. A.; Miranda, F. B.; Sousa, A. F.; Mesquita, A. L. M.; Cabral, J. E. O. Production of ornamental sunflower irrigated with oilfield produced water in the Brazilian semiarid region. Pesquisa Agropecuária Brasileira, v.52, p.443-454, 2017.

Werner, J. C.; Paulino, V. T.; Cantarella, H. Recomendação de adubação e calagem para forrageiras. In: R. B. Van; Silva, N. M.; Bataglla, O. C.; Quaggio, J. A.; Hiroce, R.; Cantarella, H.; Belllnazzi, J. R.; Dechen, A. R.; Trani, P. E. Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo. Campinas: IAC, 1996. p.263-271. (IAC, Boletim Técnico, 100).

Xu, J.; Wu, L.; Chang, A. C.; Zhang, Y. Impact of long-term reclaimed wastewater irrigation on agricultural soils: A preliminary assessment. Journal of Hazardous Materials, v.183, p.780-786, 2010.

Yan, F.; Schubert, S.; Mengel, K. Soil pH increase due to biological decarboxylation of organic anions. Soil Biology and Biochemistry, v.28, p.617-624, 1996.

Yan, N.; Marschner, P. Response of soil respiration and microbial biomass to changing EC in saline soils. Soil Biology and Biochemistry. v.65, p.322-328, 2013.

Yoon, J.; Cao, X.; Zhou, Q.; Ma, L. Q. Accumulation of Pb, Cu, and Zn in native plants growing on a contaminated Florida site. Science of the Total Environment, v.368, p.456-464, 2006.

Yruela, I. Copper in plants. Brazilian Journal of Plant Physiology, v.17, p.145-156, 2005.

Yu, X. Z.; Gu, J. D.; Huang, S. Z. Hexavalent chromium induced stress and metabolicresponses in hybrid willows. Ecotoxicology, v.16, p.299-309, 2007.

Yuan, B. C.; Xu, X. G.; Li, Z. Z.; Gao, T. P.; Gao, M.; Fan, X. W.; Deng, J. M. Microbial biomass and activity in alkalized magnesic soils under arid conditions. Soil Biology and Biochemistry, v.39, p.3004-3013, 2007.

Zanudo-Hernandez, J.; Aranda, E. G. C.; Ramirez-Hernandez, B. C.; Pimientabarrios, E.; Castillo-Cruz, I.; Pimienta-Barrios, E. Ecophysiological responses of *Opuntia* to water stress under various semi-arid environments. Journal of the Professional Association for Cactus Development, v.12, p.20-36, 2010.

Zhang, W.; Huang, H.; Tan, F.; Wang, H.; Qiu, R. Influence of EDTA washing on the species and mobility of heavy metals residual in soils. Journal Hazardous Materials, v. 173, p.369-376, 2010.