



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

ANTONIO GENILSON RODRIGUES ARAÚJO

**INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS, QUÍMICOS E
MACROFAUNA DO SOLO E EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE
PALMA FORRAGEIRA**

MOSSORÓ

2024

ANTONIO GENILSON RODRIGUES ARAÚJO

**INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS, QUÍMICOS E
MACROFAUNA DO SOLO E EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE
PALMA FORRAGEIRA**

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

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água.

Orientador: Jeane Cruz Portela, Prof. Dra.

MOSSORÓ

2024

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

Aa663 Araújo, Antonio Genilson Rodrigues .
i INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-
HÍDRICOS, QUÍMICOS E MACROFAUNA DO SOLO E
EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE PALMA
FORRAGEIRA / Antonio Genilson Rodrigues Araújo. -
2024.
51 f. : il.

Orientadora: Jeane Cruz Portela.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2024.

1. Reúso. 2. Caatinga. 3. Atributos do solo.
4. Macroartrópodes. 5. Nopalea cochenillífera. I.
Portela, Jeane Cruz, orient. II. Título.

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

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

ANTONIO GENILSON RODRIGUES ARAÚJO

**INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS, QUÍMICOS E
MACROFAUNA DO SOLO E EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE
PALMA FORRAGEIRA**

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

Linha de Pesquisa: Modelagem Ambiental e Manejo do Solo e Água.

Defendida em: 26 / 02 / 2024.

BANCA EXAMINADORA

Jeane Cruz Portela, Prof^a. Dra. (UFERSA)
Presidente

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)
Membro Examinador

Maria Laiane do Nascimento Silva, Pesquisadora Dra. (Embrapa Meio-Norte)
Membro Examinador

Joaquim Emanuel Fernandes Gondim, Pesquisador. Dr. (INSA)
Membro Examinador

Jussiara Sonally Jacome Cavalcante, Pesquisadora Dra. (Sedraf/FAPERN)
Membro Examinador

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre estar ao meu lado, concedendo todas as bênçãos possíveis, livrando de todos os males e me dando força e saúde para enfrentar os obstáculos e alcançar os meus objetivos.

À minha família, que sempre esteve ao meu lado: meu pai, Geová Nogueira de Araújo, minha mãe, Rita Rodrigues Araújo, minhas irmãs: Rosa Clara, Rosângela, Luana, Maria do Socorro e Clarice. Aos meus irmãos: Francisco, Airton, Arlindo, Alexandre, Romário e Geová Filho que, mesmo de longe, me deram todo o apoio para que eu não desistisse dos meus sonhos e dos meus objetivos.

A minha namorada Rafaela Silva por todo amor, carinho, cuidado e dedicação para comigo sempre me dando forças quando me faltava e me ajudando em todos os momentos dessa caminhada.

À minha filha, Anne Gabrieli por ser minha fonte de motivação e amor.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) pela disponibilização do espaço físico, ao Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água pela formação e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão de bolsa de estudo.

À minha querida orientadora e amiga Jeane Cruz Portela pela orientação e por todo apoio, amorosidade, atenção, cuidado e trabalho para com a minha pessoa não só na vida acadêmica, mas também na vida pessoal. Essa pessoa que não mede esforços para ajudar quem precisa. Que Deus continue abençoando-a e iluminando-a. Gratidão!

À Banca examinadora pela contribuição tão importante para o aprimoramento e melhoria do trabalho.

Aos meus amigos do PPGMSA, em especial Joaquim Gondim, Diego José, Geisiane Xavier e Claudeone Nascimento por toda ajuda nas análises e por toda amizade e companheirismo durante a minha vida acadêmica. Que Deus continue os abençoando grandemente e que vocês continuem sendo essas pessoas maravilhosas e especiais.

Ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) da UFERSA, em especial o Professor Rafael Oliveira Batista por toda ajuda, compromisso, dedicação, atenção e companheirismo durante a realização do mestrado.

Ao corpo técnico do LASAP, em especial Antônio Carlos, Paula Neitzke, Valdete, e Kaline pela ajuda nas análises.

À todos, o meu muito obrigado!

“Faça as coisas o mais simples que você puder,
porém não se restrinja às mais simples.”

Albert Einstein

RESUMO GERAL

Estudos envolvendo o uso de efluentes da aquicultura na cultura da palma forrageira, quanto aos atributos do solo são incipientes. Objetivou-se avaliar as inter-relações entre os atributos físico-hídricos, químicos e a macrofauna e o uso de efluentes da aquicultura em palma forrageira. O ensaio foi conduzido na Unidade Experimental de Reuso de Água localizada no campus leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, no delineamento experimental em blocos casualizados, com cinco tratamentos, cinco repetições e três plantas por parcela no espaçamento de 1,70 m entre fileiras e 0,20 m entre plantas. Os tratamentos foram compostos por cinco diluições do efluente da aquicultura (EA) em água de Abastecimento (AA): D1 – 100% de AA mais 0% de EA; D2 – 75% de AA mais 25% de EA; D3 – 50% de AA mais 50% de EA; D4 – 25% de AA mais 75% de EA; e D5 – 0% de AA mais 100% de EA. Para os atributos físico-hídricos e químicos do solo empregou-se o fatorial 5 (Diluições) x 2 (Profundidades) com cinco repetições. Nesses tratamentos e na mata nativa foram coletadas amostras em duas camadas de solo (0 a 0,10 m e 0,10 a 0,20m) com estrutura deformada para as análises físicas (granulometria, argila dispersa em água, índice de floculação) e químicas (pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , P, K^+ , (H+Al) e COT) e indeformada para a realização das análises físicas (densidade do solo e agregados) e hídricas (curva de retenção de água no solo; macroporos, microporos, porosidade total e condutividade hidráulica relativa) O estudo dos macroartrópodes foi realizado em função da sazonalidade. As variáveis foram submetidas ao teste de comparação de médias Tukey ($p < 0,05$). Os dados também foram interpretados por meio da técnica estatística multivariada (matriz de correlação de Pearson, análise fatorial e componentes principais). Por meio da ACP foi feita a discriminação dos atributos do solo e diluições de efluente da aquicultura em palma forrageira. Assim, Argila, Na^+ , pH, PST, V e, em menor proporção, Mg^{2+} discriminaram todas as diluições na camada subsuperficial (0,10-0,20m). Esses atributos foram influenciados, principalmente, pelos valores crescentes de Na^+ e Mg^{2+} presentes na água das diluições e à natureza alcalina das mesmas. Os índices ecológicos de Shannon (H'), Pielou (e) e Simpson (S), N, K^+ , Ca^{2+} , CE, SB, CTC, (H+Al), COT, Silte, CC e, em menor proporção, microporosidade discriminaram a mata nativa, em função, principalmente, do número de indivíduos contabilizados, diversidade de espécies, COT, e pela baixa precipitação pluvial com menor lixiviação das bases. AD, Pt, P, macroporosidade, IF, DMP e areia discriminaram as diluições (D1, D2, D3 e D5) na camada superficial (0,00-0,10m). Assim como, o índice ecológico e(C) discriminou, principalmente, D4 na mesma camada. Isso mostra a contribuição das diluições aliada à diversidade da macrofauna para melhorar a porosidade do solo em superfície e a condutividade hidráulica do solo. O teste de Tukey reforçou esses resultados pois houve diferença estatística para as diluições D3 (IF) e D4 (Macro e DMP). De forma geral, os atributos estruturais, químicos e os índices ecológicos, discriminaram a mata nativa sendo importante para preservação ambiental. Os atributos hídricos, especialmente Kr, estruturais e índices ecológicos discriminaram as diluições, indicando melhoria na funcionalidade estrutural do solo. A diluição D2 contribuiu significativamente para a microporosidade, COT, Mg^{2+} e Na^+ do solo, a diluição D3 para o IF e a D4 para macroporosidade e DMP. A diluição D3 é a mais indicada para o cultivo da palma

forrageira, com menor restrição quanto ao Na^+ . O número de ordens e os índices ecológicos de diversidade dos macroartrópodes variam de acordo com a diluição aplicada e a sazonalidade.

Palavras-chave: Reúso, Caatinga, Atributos do solo, Macroartrópodes, *Nopalea cochenillifera*.

GENERAL ABSTRACT

Studies involving the use of aquaculture effluents in cactus cultivation, regarding soil attributes, are incipient. The objective was to evaluate the interrelationships between physical-water, chemical attributes and macrofauna and the use of aquaculture effluents in forage cactus. The trial was conducted at the Water Reuse Experimental Unit located on the east campus of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido, in a randomized block experimental design, with five treatments, five replications and three plants per plot with a spacing of 1.70 m between rows and 0.20 m between plants. The treatments were composed of five dilutions of aquaculture effluent (EA) in supply water (AA): D1 – 100% AA plus 0% EA; D2 – 75% AA plus 25% EA; D3 – 50% AA plus 50% EA; D4 – 25% AA plus 75% EA; and D5 – 0% AA plus 100% EA. For the physical-water and chemical attributes of the soil, the factorial 5 (Dilutions) x 2 (Depths) was used with five replications. In these treatments and in the native forest, samples were collected in two layers of soil (0 to 0.10 m and 0.10 to 0.20 m) with a deformed structure for physical (granulometry, clay dispersed in water, flocculation index) and chemical analyzes (pH, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , P, K^+ , (H+Al) and TOC) and undisturbed for carrying out physical (soil and aggregate density) and water analyzes (soil water retention curve; macropores, micropores, total porosity and relative hydraulic conductivity) The study of macroarthropods was carried out depending on seasonality. The variables were subjected to the Tukey mean comparison test ($p < 0.05$). The data were also interpreted using multivariate statistical techniques (Pearson correlation matrix, factor analysis and principal components). Through ACP, soil attributes and aquaculture effluent dilutions were discriminated in forage cactus. Thus, Clay, Na^+ , pH, PST, V and, to a lesser extent, Mg^{2+} discriminated all dilutions in the subsurface layer (0.10-0.20m). These attributes were influenced, mainly, by the increasing values of Na^+ and Mg^{2+} present in the water of the dilutions and their alkaline nature. The ecological indices of Shannon (H'), Pielou (e) and Simpson (S), N, K^+ , Ca^{2+} , EC, SB, CEC, (H+Al), TOC, Silt, CC and, to a lesser extent, microporosity discriminated against native forest, mainly due to the number of individuals counted, species diversity, TOC, and low rainfall with less leaching of the bases. AD, Pt, P, macroporosity, FI, WAD and sand discriminated the dilutions (D1, D2, D3 and D5) in the surface layer (0.00-0.10m). Likewise, the ecological index e(C) mainly discriminated against D4 in the same layer. This shows the contribution of dilutions combined with macrofauna diversity to improve surface soil porosity and soil hydraulic conductivity. The Tukey test reinforced these results as there was a statistical difference for dilutions D3 (FI) and D4 (Macro and WAD). In general, structural and chemical attributes and ecological indices discriminated against native forest being important for environmental preservation. The water attributes, especially Kr, structural and ecological indices discriminated the dilutions, indicating an improvement in the structural functionality of the soil. Dilution D2 contributed significantly to soil microporosity, TOC, Mg^{2+} and Na^+ , dilution D3 to IF and D4 to macroporosity and WAD. The D3 dilution is the most suitable for the cultivation of cactus pear, with less restriction regarding Na^+ . The number of orders and ecological diversity indices of macroarthropods vary according to the applied dilution and seasonality.

Keywords: Reuse, Caatinga, Soil attributes, Macroarthropods, *Nopalea cochenillifera*.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Mapa de localização da área experimental.....	24
Figura 2	–	Experimento palma forrageira nos períodos chuvoso e seco.....	25
Figura 3	–	Croqui da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos.....	26
Figura 4	–	Armadilhas instaladas na área experimental (A); Contagem dos macroartrópodes em laboratório (B).....	32
Figura 5	–	Distribuição das variáveis no círculo de correlações (A) e distribuição da nuvem de pontos que representa a relação entre os fatores 1 e 2 (B).....	40
Figura 6	–	Curvas de retenção de água no solo dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	– Caracterização dos atributos físicos e químicos da área antes da instalação do experimento.....	26
Tabela 2	– Médias dos valores da caracterização química das diluições de efluente da aquicultura em água de abastecimento, Mossoró-RN.....	27
Tabela 3	– Matriz de correlação linear de Pearson entre os atributos inorgânicos, biológicos e químicos e hídricos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	34
Tabela 4	– Eixos fatoriais extraídos e rotacionados pelo método Varimax cujas cargas fatoriais $\geq 0,65$ foram consideradas significativas.....	36
Tabela 5	– Médias dos atributos físicos e estruturais dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	41
Tabela 6A	Médias dos atributos químicos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	42
Tabela 6B	Médias dos atributos químicos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	43
Tabela 7	Parâmetros das curvas de retenção de água no solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	46
Tabela 8	Número de indivíduos por ordem em função da sazonalidade e tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	47
Tabela 9	Índices de diversidade ecológica de Shannon (H), Pielou (e) e Simpson (S) para os tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.....	48

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL	14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	17
2. ARTIGO 1: INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS, QUÍMICOS E MACROFAUNA DO SOLO E EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA	20
RESUMO	20
ABSTRACT	21
1. INTRODUÇÃO.....	22
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	23
2.1 Descrição do local	23
2.2 Delineamento experimental, condução e sistema de irrigação.	24
2.2.1 Caracterização química do solo antes da instalação do experimento.....	25
2.2.2 Caracterização química das diluições de efluente da aquicultura em água de abastecimento	26
2.3 Coleta e preparo das amostras de solo	27
2.4 Análises físico-hídricas e estruturais.....	27
2.4.1 Curva de retenção de água no solo.....	27
2.4.2 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total.....	28
2.4.3 Densidade do solo	29
2.4.4 Análise granulométrica, argila dispersa em água e índice de floculação.....	29
2.4.5 Agregados.....	29
2.5 Análises químicas.....	30
2.6 Coleta e análise dos macroartrópodes do solo	31
2.7 Análise estatística.....	32
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4. CONCLUSÕES	48
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	49

1. INTRODUÇÃO GERAL

O semiárido brasileiro engloba os estados do Maranhão, Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia e Minas Gerais (IBGE, 2017), sendo caracterizado pela presença de quadros climáticos extremos conhecidos como binômio seca-chuva (Aguiar *et al.*, 2019). Possui características como precipitações pluviais baixas e mal distribuídas ao longo do ano, temperaturas médias elevadas e altas taxas de evapotranspiração (Dubreuil *et al.*, 2018).

Isso, associado às altas taxas de evapotranspiração, que reduzem a retenção de água no solo e consequentemente, dificulta ou inviabiliza a atividade agrícola. (Alados; Puigdefábregas; Martínez-Fernández, 2011; Soares; Campos, 2013). Dessa forma, a escassez hídrica é um dos principais gargalos para o sucesso da atividade agropecuária na região semiárida. Apesar do semiárido possuir essas características climáticas que limitam ou, em muitos casos, inviabilizam a atividade agrícola (Descheemaeker *et al.*, 2010; Sathler, 2021) a região se destaca na aquicultura (Kirchner *et al.*, 2016).

De acordo com a FAO (2022), a produção nacional de pescados no ano de 2019 foi de 599,18 mil toneladas colocando o país na 13ª posição no ranking geral dos maiores produtores de pescado e a região Nordeste foi a que apresentou a maior participação de mercado no país, com 26,8% (Ximenes *et al.*, 2021). A partir dessas informações pode-se perceber a importância da aquicultura para a segurança alimentar da região semiárida (FAO, 2021). Por outro lado, essa atividade gera efluentes que se descartados de maneira incorreta, sem o devido tratamento, pode trazer prejuízos ambientais, econômicos e sociais, pois estas impedem a assimilação de carbono, nitrogênio e fósforo pelas plantas (Boyd, Queiroz, 2004; Oliveira, Santos, 2015), eutrofização de corpos hídricos, o que reduz a biodiversidade local, afetando assim, a sociedade como um todo (Henry-Silva; Camargo, 2009; Oliveira; Santos, 2015).

Esse efluente possui uma composição química constituída de sais de Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e na forma de cloretos (Cl^-), sulfatos (SO_4^{2-}), bicarbonatos (HCO_3^-) e carbonatos (CO_3^{2-}), os quais podem apresentar diferentes proporções, dependendo da fonte de água, época de coleta, localização geográfica, entre outros (Koe *et al.*, 2023). Apesar dessa abundância de nutrientes, a deposição dessa água no solo, sem um tratamento adequado, pode causar alterações na condutividade hidráulica (Bond, 1998) e salinização do solo (Medeiros, 1992; Vallejos *et al.*, 2022). Além disso, altera a composição iônica no complexo sortivo, modificando os atributos físicos e químicos do solo (Erthal *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2020).

No Brasil, o órgão responsável pela definição de critérios e procedimentos para o reuso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas,

laticínios, frigoríficos e graxarias é o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) por meio da resolução 503, de 14 de dezembro de 2021 (BRASIL, 2021). Já quem estabelece diretrizes, critérios e parâmetros para o reúso de água para fins não potáveis é o Conselho Estadual de Meio Ambiente (COEMA) por meio da Resolução nº 02 de fevereiro de 2017 (Ceará, 2017).

Nesse cenário, a palma forrageira por apresentar características como uma adaptação a regiões áridas e semiáridas, rica em carboidratos não fibrosos, possui elevada digestibilidade além de ser constituída por cerca de 90% água, servindo para suprir parte da necessidade hídrica dos animais (Lemos *et al.*, 2021). O seu cultivo utilizando efluentes da aquicultura, é uma alternativa eficaz tanto como fonte nutricional e hídrica para a palma forrageira, quanto para evitar a eliminação de possíveis contaminantes, interferindo nos atributos do solo.

Assim, o processo de estruturação do solo se dá pela ação de ciclos físicos, químicos biológicos que dependem de diversos fatores: quantidade e tipo de argila, óxidos e hidróxidos de ferro, manganês e alumínio, substâncias orgânicas exsudadas pelas plantas e pela fauna do solo e outros compostos orgânicos presentes, além dos ciclos de umedecimento e secagem. A matéria orgânica, assim como os óxidos e hidróxidos atuam como agentes cimentantes, contribuindo para a formação dos agregados do solo, como, também, cátions mono, bi e trivalentes sendo substituídos no complexo de troca (Fachin; Gonçalves Júnior; Thomaz, 2019) favorecendo os processos de dispersão e/ou floculação (Erthal *et al.*, 2010; Tang *et al.*, 2020).

Sabendo disso, e que os efluentes da aquicultura possuem elevadas concentrações de matéria orgânica, Na^+ , K^+ e outros nutrientes (Koe *et al.*, 2023), se faz necessário o estudo dos atributos estruturais em ambientes que recebem esse resíduo, como: diâmetro médio ponderado (DMP) e o índice de estabilidade dos agregados (IEA), argila dispersa em água (ADA), grau de floculação (GF), que são importantes no estudo da funcionalidade estrutural (Rocha *et al.*, 2020), bem como, os atributos químicos: carbono orgânico total (COT), condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), percentagem de sódio trocável (PST), dentre outros.

Nesse contexto, os atributos do solo influenciam nos organismos edáficos que desempenham funções ambientais correlacionadas, principalmente, com a decomposição da matéria orgânica, ciclagem de nutrientes e construção de ninhos e tuneis (Amarasinghe *et al.*, 2023; Aqeel *et al.*, 2024), sendo considerados bioindicadores da funcionalidade do solo, em face de sua sensibilidade às mudanças ambientais (Vanolli *et al.*, 2023).

Dessa maneira, é importante o estudo das correlações entre os atributos do solo e os efluentes da aquicultura em palma forrageira, principalmente, para as regiões áridas e semiáridas. No entanto, informações dessa natureza não são compreendidas, principalmente

envolvendo a funcionalidade estrutural do solo, que engloba a dinâmica físico-hídrica, conhecimento essencial ao planejamento agrícola e ambiental e conservação do solo.

Com isso, foram elaboradas as seguintes hipóteses:

O uso de efluentes da aquicultura em palma forrageira altera os atributos químicos do solo pela adição de nutrientes, especialmente as diluições com maior concentração do efluente, com impactos positivos na fertilidade do solo.

A utilização de efluentes da aquicultura na irrigação de palma forrageira modifica negativamente os atributos físico-hídricos do solo como a micro e porosidade total, retenção de água e densidade do solo, em função da adição dos cátions básicos monovalentes como sódio (Na^+) e potássio (K^+) que são agentes dispersantes e positivamente pela adição dos cátions bivalentes (Ca^{2+} , Mg^{2+}) que são flocculantes.

O período seco associado a irrigação com efluentes da aquicultura interfere na redução dos índices ecológicos e grupos funcionais dos macroartrópodes edáficos em função da redução da biomassa vegetal e da alteração nas características físico-hídricas do solo pelas diluições.

A partir dessas considerações os objetivos desse trabalho foram: Apontar quais atributos do solo discriminaram as diluições do efluente da aquicultura em água de abastecimento e a mata nativa; Apontar o(s) atributo(s) físico(s), hídrico(s) e químico(s) do solo que foram alterados, quanto a funcionalidade estrutural do solo, pela aplicação de diluições de efluente de aquicultura em água de abastecimento de forma que o cultivo de espécies forrageiras seja desenvolvido de maneira eficiente e sustentável, quanto ao uso da água e a preservação do solo; Fornecer informações a respeito da sazonalidade de organismos bioindicadores e suas relações com o uso de efluentes da aquicultura no cultivo de palma forrageira.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, L. C. **Articulação e coordenação nas políticas públicas para o desenvolvimento rural: o caso do projeto Dom Hélder Câmara – PDH**. 107 f. Dissertação. (Mestrado em Agronegócios) – Faculdade de Agronomia e Medicina Veterinária, Universidade de Brasília, Brasília, 2019.

ALADOS, Concepción L.; PUIGDEFÁBREGAS, Juan; MARTÍNEZ-FERNÁNDEZ, Jesús. Ecological and socio-economical thresholds of land and plant-community degradation in semi-arid Mediterranean areas of southeastern Spain. **Journal of Arid Environments**, v. 75, n. 12, p. 1368-1376, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.12.004>. Acesso em: 10 de jan. 2024.

AMARASINGHE, A. *et al.* The role of edaphic variables and management practices in regulating soil microbial resilience to drought-A meta-analysis. **Science of The Total Environment**, v. 912, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169544>. Acesso em: 15 jan.2024.

AQEEL, M. *et al.* Interplay between edaphic and climatic factors unravels plant and microbial diversity along an altitudinal gradient. **Environmental Research**, v. 242, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117711>. Acesso em: 10 fev. 2024.

BAHRI, T. *et al.* (Ed.). **Gestão adaptativa das pescas em resposta às alterações climáticas: documento técnico da FAO sobre pesca e aquicultura n.º 667**. Organização de Alimentação e Agricultura, 2021.

BOND, W. J. Effluent irrigation an environmental challenge for soil science. **Australian Journal of Soil Research**, v.36, p.543-555,1998.

BOYD, C. E.; QUEIROZ, J. F. Manejo das condições do sedimento do fundo e da qualidade da água e dos efluentes de viveiros. In: CYRINO, J. E. P. *et al.* (ed.). **Tópicos especiais em piscicultura de água doce tropical intensiva**. São Paulo: TecArt, 2004. p. 25-44.

BRASIL. Resolução Conama nº 503 de 14 de dezembro de 2021. Define critérios e procedimentos para o reuso em sistemas de fertirrigação de efluentes provenientes de indústrias de alimentos, bebidas, laticínios, frigoríficos e graxarias. **Diário Oficial da União**, n. 236 seção 1, p. 203, Brasília, DF, 14 de dez. 2021.

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 25 de novembro de 2002. **Diário oficial do Estado do Ceará**, Fortaleza, 21 de fevereiro de 2017.

DESCHEEMAER, K. *et al.* Effects of integrated watershed management on livestock water productivity in water scarce quic in Ethiopia. **Physics and Chemistry of the Earth**, Oxford, v. 35, n. 13-14, p. 723-729, 2010.

ERTHAL, V. T. *et al.* Características fisiológicas, nutricionais e rendimento de forrageiras fertigadas com água residuária de bovinocultura. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**

e Ambiental. v.14, n.5, p.458–466, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662010000500002>. Acesso em: 10 de dez. 2023.

FACHIN, P. A.; GONÇALVES JÚNIOR, E. V.; THOMAZ, E. L. Comparação entre dois modelos de Agitador de Yoder na avaliação da estabilidade de agregados de solo. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.12, n.2, p. 697-704, 2019. DOI: 10.26848/rbgf.v12.2.p697-704. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/paulo-Fachin/publication/333658509>. Acesso em 09 de fev. 2024.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. **The state of world fisheries and aquaculture: opportunities and challenges**. Rome: FAO, 2016. 243 p.

FAO – FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS. The State of World Fisheries and Aquaculture 2022. **Towards Blue Transformation**. Rome, FAO. Disponível em: <https://doi.org/10.4060/cc0461en>. Acesso em: 14 de fev. 2024.

HENRY-SILVA, G. G; CAMARGO, A. F. M. Impacto das atividades de aquicultura e sistemas de tratamento de efluentes com macrófitas aquáticas – relato de caso. **Boletim do Instituto de Pesca**, v. 34, n.1, p. 163-173, 2009.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. 2017. **Censo Demográfico**. Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 10 de janeiro de 2024.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. Produto interno bruto – PIB. Rio de Janeiro: IBGE, 2018.

KIRCHNER, J. W. Aggregation in environmental systems – Part 1: Seasonal tracer cycles quantify young water fractions, but not mean transit times, in spatially heterogeneous catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, ed. 1, p. 279-297, 2016.

KOE, A. Z. Y. *et al.* Nutrient recovery from freshwater aquaculture effluent by employing seawater driven zeolite-assisted forward osmosis process. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 11, n. 6, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2023.111267>. Acesso em: 16 jan. 2024.

LEMOS, M. de *et al.* The effect of domestic sewage effluent and planting density on growth and yield of prickly pear cactus in the semiarid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 185, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104372>. Acesso em: 12 de fev. 2024.

MEDEIROS, J. F. **A qualidade da água de irrigação e evolução da salinidade nas propriedades assistidas pelo “GAT” nos Estados do RN, PB e CE**. Campina Grande-PB: 1992. 173f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal da Paraíba. Campina Grande.

OLIVEIRA, E. G. de; SANTOS, F. J. de S. Piscicultura e os desafios de produzir em regiões com escassez de água. **Ciência Animal**, v. 25, n. 1, p. 133-154, 2015. Disponível em:

<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1064819>. Acesso em: 10 de dez. 2024.

SATHLER, D. Understanding human development, poverty and water scarcity patterns in the Brazilian Semi-arid through cluster analysis. **Environmental Science & Policy**, v. 125, p. 167-178, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2021.09.004>. Acesso em: 15 de fev. 2024.

SOARES, R. B.; CAMPOS, K. C. Uso e disponibilidade hídrica no Semiárido do Brasil. **Revista de Política Agrícola**, v. 22, n. 3, p. 48-57, 2013.

TANG, S. *et al.* Effect of salinity on soil structure and soil hydraulic characteristics. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 101, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0018>. Acesso em: 5 de jan. 2024.

VALLEJOS, M. B. *et al.* Salinity and N input drive prokaryotic diversity in soils irrigated with treated effluents from fish-processing industry. **Applied Soil Ecology**, v. 175, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104443>. Acesso em: 17 de fev. 2024.

VANOLLI, B. S. *et al.* Edaphic and epigeic macrofauna responses to land use change in Brazil. **European Journal of Soil Biology**, v. 117, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2023.103514>. Acesso em: 15 jan. 2024.

XIMENES, L. F. Produção de pescado no Brasil e no Nordeste brasileiro. **Caderno Setorial ETENE**, Ano 5, n. 150, p. 1-16. 2021. Disponível em: <https://bnb.gov.br/s482-dspace/handle/123456789/649>. Acesso em: 10 jan. 2024.

2. ARTIGO 1: INTER-RELAÇÕES ENTRE OS ATRIBUTOS FÍSICO-HÍDRICOS, QUÍMICOS E MACROFAUNA DO SOLO E EFLUENTE DA AQUICULTURA NA PRODUÇÃO DE PALMA FORRAGEIRA

RESUMO

O uso de efluentes da aquicultura em palma forrageira é uma alternativa para a irrigação da cultura frente as condições semiáridas do Brasil. Objetivou-se avaliar as inter-relações entre os atributos físicos-hídricos, químicos e macrofauna e o uso de efluentes da aquicultura em palma forrageira. O experimento foi conduzido na Unidade Experimental de Reuso de Água localizada na Universidade Federal Rural do Semi-Árido, no delineamento experimental em blocos casualizados, cinco tratamentos, cinco repetições e três plantas por parcela espaçadas de 0,20 m. Os tratamentos compostos por cinco diluições do efluente da aquicultura (EA) em água de Abastecimento (AA): D1 – 100% AA mais 0% EA; D2 – 75% AA mais 25% EA; D3 – 50% AA mais 50% de EA; D4 – 25% AA mais 75% EA; e D5 – 0% AA mais 100% EA. Para os atributos físico-hídricos e químicos do solo empregou-se o fatorial 5 (Diluições) x 2 (Profundidades) com cinco repetições. Foram feitas análises físico-hídricas e químicas do solo em duas profundidades (0-0,10 m e 0,10-0,20 m): granulométrica, ADA, IF, Ds, agregados, pH, CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , P, K^+ , (H+Al), COT, curva de retenção de água no solo, macroporos, microporos, porosidade total e Kr. Os macroartrópodes foram analisados em função da sazonalidade. As variáveis foram submetidas ao teste de comparação de médias Tukey ($p < 0,05$). Os dados também foram interpretados por meio da técnica estatística multivariada (Matriz de correlação de Pearson, Análise Fatorial e Componentes principais). Por meio da ACP foi feita a discriminação dos atributos do solo e diluições de efluente da aquicultura em palma forrageira. Assim, Argila, Na^+ , pH, PST, V e, em menor proporção, Mg^{2+} discriminaram todas as diluições na camada de subsuperficial (0,10-0,20m). Essas variáveis foram influenciadas, principalmente pela composição da água das diluições. Os índices ecológicos de Shannon (H'), Pielou (e) e Simpson (S), N, K^+ , Ca^{2+} , CE, SB, CTC, (H+Al), COT, Silte, CC e, em menor proporção, microporosidade discriminaram a mata nativa. Isso se justifica, principalmente em função do COT, clima e os macroartrópodes. AD, Pt, P, macroporosidade, IF, DMP e areia discriminaram as diluições (D1, D2, D3 e D5) na camada superficial (0,00-0,10m). Assim como, o índice ecológico $e(C)$ discriminou D4 na mesma camada. Isso mostra a contribuição das diluições aliada à diversidade da macrofauna para melhorar a porosidade do solo em superfície, refletindo na água disponível para as plantas e na condutividade hidráulica do solo. O teste de Tukey reforçou esses resultados pois houve diferença estatística para as diluições D3 (IF) e D4 (Macro e DMP). De forma geral, os atributos estruturais, químicos e os índices ecológicos, discriminaram a mata nativa sendo importante para preservação ambiental. Os atributos hídricos, especialmente Kr, estruturais e índices ecológicos discriminaram as diluições, indicando melhoria na funcionalidade estrutural do solo. A diluição D2 favoreceu a microporosidade, COT, Mg^{2+} e Na^+ do solo, a D3 o IF e a D4 macroporosidade e DMP. A diluição D3 é a mais indicada para o cultivo da palma forrageira, com menor restrição quanto ao Na^+ . O número de ordens e os índices ecológicos de diversidade dos macroartrópodes variam de acordo com a diluição aplicada e a sazonalidade.

Palavras-chaves: Semiárido, Funcionalidade estrutural do solo, Diluições, Índices ecológicos, Retenção de água, Sazonalidade.

PAPER 1: INTERRELATIONSHIPS BETWEEN THE PHYSICAL-HYDRIC, CHEMICAL ATTRIBUTES AND MACROFAUNA OF THE SOIL AND AQUACULTURE EFFLUENT IN FORAGE PALM PRODUCTION

ABSTRACT

The use of aquaculture effluents in forage cactus is an alternative for crop irrigation in the semi-arid conditions of Brazil. The objective was to evaluate the interrelationships between physical-water, chemical and macrofauna attributes and the use of aquaculture effluents in forage cactus. The experiment was conducted at the Water Reuse Experimental Unit located at the Universidade Federal Rural do Semi-Árido, in a randomized block experimental design, five treatments, five replications and three plants per plot spaced 0.20 m apart. The treatments consisted of five dilutions of aquaculture effluent (EA) in supply water (AA): D1 – 100% AA plus 0% EA; D2 – 75% AA plus 25% EA; D3 – 50% AA plus 50% EA; D4 – 25% AA plus 75% EA; and D5 – 0% AA plus 100% EA. For the physical-water and chemical attributes of the soil, the factorial 5 (Dilutions) x 2 (Depths) was used with five replications. Physico-hydric and chemical analyzes of the soil were carried out at two depths (0-0.10 m and 0.10-0.20 m): particle size, CDW, FI, Ds, aggregates, pH, EC, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , P, K^+ , (H+Al), TOC, soil water retention curve, macropores, micropores, total porosity and Kr. Macroarthropods were analyzed depending on seasonality. The variables were subjected to the Tukey mean comparison test ($p < 0.05$). The data were also interpreted using the multivariate statistical technique (Pearson correlation matrix, Factor Analysis and Principal Components). Through ACP, soil attributes and aquaculture effluent dilutions were discriminated in forage cactus. Thus, Clay, Na^+ , pH, PST, V and, to a lesser extent, Mg^{2+} discriminated all dilutions in the subsurface layer (0.10-0.20m). These variables were influenced mainly by the composition of the water in the dilutions. The ecological indices of Shannon (H'), Pielou (e) and Simpson (S), N, K^+ , Ca^{2+} , EC, SB, CEC, (H+Al), TOC, Silt, CC and, to a lesser extent, microporosity discriminated against the native forest. This is justified, mainly due to the TOC, climate and macroarthropods. AD, Pt, P, macroporosity, FI, WAD and sand discriminated the dilutions (D1, D2, D3 and D5) in the surface layer (0.00-0.10m). Likewise, the ecological index $e(C)$ discriminated D4 in the same layer. This shows the contribution of dilutions combined with macrofauna diversity to improve soil porosity on the surface, reflecting the water available for plants and the soil's hydraulic conductivity. The Tukey test reinforced these results as there was a statistical difference for dilutions D3 (IF) and D4 (Macro and WAD). In general, structural and chemical attributes and ecological indices discriminated against native forest being important for environmental preservation. The water attributes, especially Kr, structural and ecological indices discriminated the dilutions, indicating an improvement in the structural functionality of the soil. The D2 dilution favored soil microporosity, TOC, Mg^{2+} and Na^+ , D3 the FI and D4 macroporosity and WAD. The D3 dilution is the most suitable for the cultivation of cactus pear, with less restriction regarding Na^+ . The number of orders and ecological diversity indices of macroarthropods vary according to the applied dilution and seasonality.

Keywords: Semi-arid, Soil structural functionality, Dilutions, Ecological indices, Water retention, Seasonality.

1. INTRODUÇÃO

O semiárido brasileiro está presente em 18,2% do território nacional e representa 53% da região nordeste do país (IBGE, 2017). O clima dessa região possui características como baixas precipitações pluviais (entre 400 e 800) mal distribuídas ao longo do ano, altas taxas de evapotranspiração e altas temperaturas. Essas características climáticas fazem com que a escassez hídrica se estenda por quase todo o ano (Dubreuil *et al.*, 2018).

Apesar dessa região possuir essas características climáticas, a mesma é uma produtora de pescado que gera cerca de 50 mil empregos diretos e indiretos por ano sendo muito importante para população local (Kirchner *et al.*, 2016), porém essa atividade gera efluentes que se não tiverem uma destinação correta, podem trazer malefícios ao meio ambiente, principalmente relacionadas às características físicas, químicas e biológicas do solo (Ibrahim *et al.*, 2023).

Esse efluentes possuem uma composição variada de nutrientes em excesso, principalmente nitrogênio e fósforo, sólidos em suspensão, compostos orgânicos e outros materiais (Koe *et al.*, 2023) que necessitam de destinação adequada para que seja mitigado danos ambientais (Loh *et al.*, 2023).

Uma das principais atividades desenvolvidas no semiárido brasileiro é a pecuária, sendo a produção de forragens feita em grandes áreas, porém caracterizada por um baixo potencial forrageiro com baixa produção de biomassa vegetal (Coêlho *et al.*, 2021). Por esse motivo, os agricultores utilizam a palma forrageira para garantir a sobrevivência dos animais, principalmente nos períodos de baixa disponibilidade hídrica (Lemos *et al.*, 2021).

Essa cultura possui elevada adaptação a ambientes secos e é altamente eficiente no uso da água, sendo considerada uma ótima alternativa para melhorar o suprimento de nutricional e parte da necessidade hídrica dos animais, principalmente durante o período de escassez hídrica (Júnior *et al.*, 2023). Apesar de possuir essas características rústicas, a cultura não expressa todo seu potencial produtivo nas condições naturalmente produzidas, podendo ter seu crescimento melhorado com o uso da irrigação de pequenas quantidades de água (Dantas *et al.*, 2023).

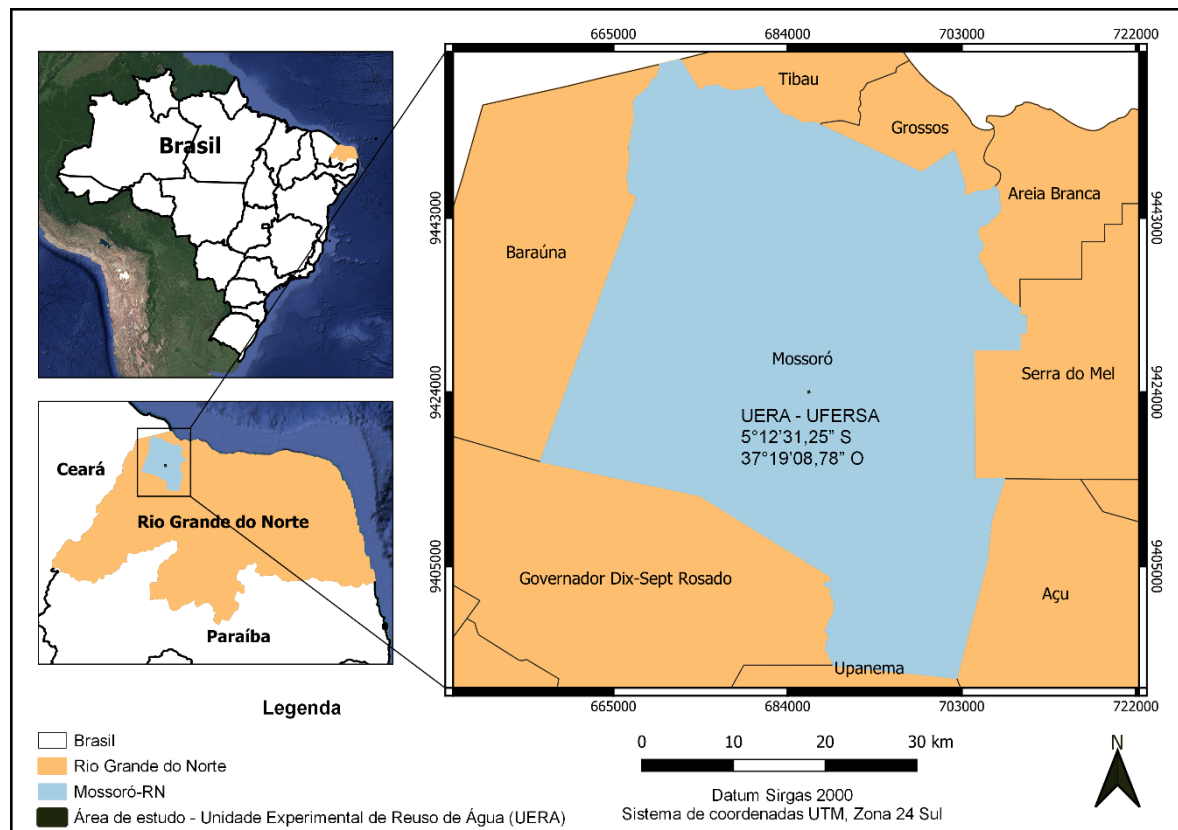
Frente a isso, o uso de efluentes da aquicultura na irrigação de palma forrageira pode ser considerado uma alternativa eficiente para o cultivo da cultura, tanto como destinação final dos efluentes da aquicultura como também para o suprimento hídrico e parte do nutricional da cultura. Porém estudos sobre os impactos do uso de efluentes da aquicultura nos atributos químicos e, principalmente, físicos, hídricos e estruturais são incompreendidos necessitando uma investigação sobre o tema.

A partir dessas considerações, o objetivo do presente trabalho foi estudar as inter-relações entre e os atributos físico-hídricos, químicos e a macrofauna do solo e diluições do efluente da aquicultura em água de abastecimento em áreas de cultivo de palma forrageira.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Descrição do local

O experimento foi conduzido na Unidade Experimental de Reuso de Água (UERA) pertencente ao Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais, do Centro de Engenharias do campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, localizada a $5^{\circ}12'31,25''$ de latitude Sul e $37^{\circ}19'08,78''$ de longitude Oeste (Figura 1).



Fonte: Araújo (2023). Base de dados: IBGE (2021).

Figura 1. Mapa de localização da área experimental.

O clima do município é classificado, segundo Koppen, como tipo BSh, muito quente e com chuvas no verão, apresentando temperatura média anual de $27,4^{\circ}\text{C}$, precipitação pluvial anual média de 673,9 mm de forma irregular e umidade de 68,9% (Dubreuil *et al.*, 2018).

O solo da área experimental foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, de acordo com o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (Santos *et al.*, 2018).

2.2 Delineamento experimental, condução e sistema de irrigação.

O experimento foi instalado sob delineamento em blocos casualizados com cinco tratamentos e cinco repetições (Figura 2). Para avaliação dos atributos físico-hídricos e químicos do solo foi considerado o fator profundidades (0-0,10 m e 0,10-0,20m), além do fator diluição, nesse caso também se utilizou um esquema fatorial 5 (Diluições) x 2 (Profundidades) com cinco repetições.



Fonte: Araújo (2023).

Figura 2. Experimento palma forrageira nos períodos chuvoso e seco.

Os tratamentos foram compostos por quatro diluições do efluente da aquicultura (EA) em água de abastecimento (AA) e o controle: a) D1 (controle) – 100% de AA mais 0% de EA; b) D2 – 75% de AA mais 25% de EA; c) D3 – 50% de AA mais 50% de EA; d) D4 – 25% de AA mais 75% de EA; e e) D5 – 0% de AA mais 100% de EA.

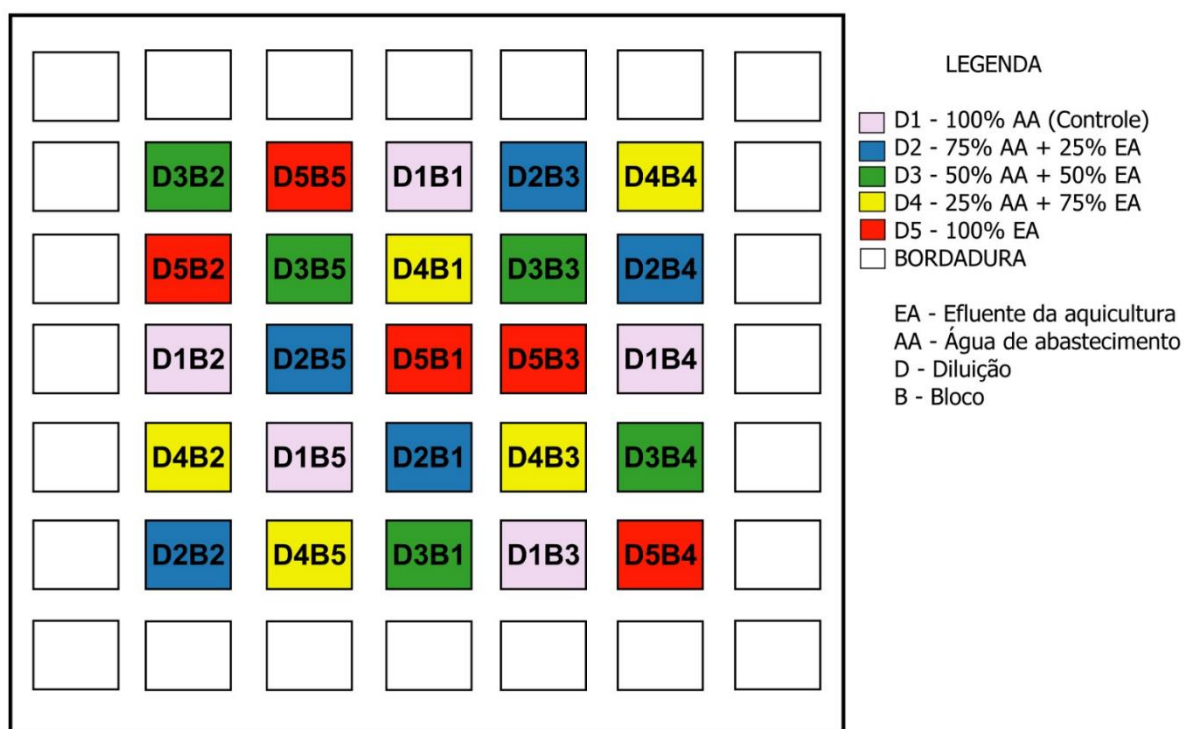
A área experimental apresenta 8 m de comprimento e 7 m de largura e área de 56 m². Nessa, foram distribuídas 25 parcelas experimentais com espaçamento de 1,0 x 1,0 m, contando com três plantas por unidade experimental. Os procedimentos de montagem do experimento foram adaptados do trabalho de Coelho *et al.* (2015) e de Costa *et al.* (2018).

Nas parcelas foram plantadas mudas de um genótipo de palma forrageira denominado *Nopalea cochenillifera* (L.) Salm Dyck (Palma Miúda). Em cada parcela foram plantadas três mudas de 0,25 m de comprimento, enterradas a 0,15 m de profundidade no solo com espaçamento de 0,30 m entre cada uma. Além disso, no período de outubro de 2021 a setembro de 2023 não foi realizada calagem e nem adubação mineral de fundação e/ou cobertura,

seguindo as recomendações de Costa et al. (2018). Também não foi realizado nenhum tipo de aplicação de defensivo agrícola para o controle de pragas e/ou patógenos.

A água residuária foi procedente dos tanques do setor de aquicultura da UFERSA situada no Município de Mossoró - RN e a água de abastecimento proveniente de um poço artesiano da UFERSA gerenciado pela Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), no mesmo município. A palma forrageira foi irrigada uma vez por semana, com base na evapotranspiração do dia anterior, por um período de dois anos, utilizando sistema de irrigação por gotejamento. Intercalou-se a cada sete dias irrigação com água de abastecimento e aplicação das cinco diluições do efluente da aquicultura, com auxílio de regadores.

Durante dois anos de cultivo da palma forrageira, foram aplicados via irrigação e aplicação de diluições 492 mm, sendo 178 mm no primeiro ano e 314 mm no segundo ano.



Fonte: Araújo (2023).

Figura 3. Croqui da área experimental com a disposição das parcelas e respectivos tratamentos.

2.2.1 Caracterização química do solo antes da instalação do experimento

A caracterização física e química do solo da área antes da instalação do experimento foi realizada por Pedrosa (2023) para fins interpretação dos resultados (Tabela 1).

Tabela 1. Caracterização dos atributos físicos e químicos da área antes da instalação do experimento.

Camadas	Argila	Silte	Areia	Ds	pH	CE	MO	CTC	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Na ⁺	P	PST
m		g/ kg		g/cm ³	H ₂ O	dS /m	g/kg		cmol _c /dm ³			mg/ dm ³		%
0,00-0,20	50	110	840	1,63	6,19	0,12	8,0	5,07	3,17	1,55	0,35	0,0	153,4	0,00
0,20-0,40	94	94	812	1,43	6,55	0,09	4,2	4,53	2,66	1,58	0,29	1,9	204,8	0,00

Fonte: Pedrosa (2023).

Ds: Densidade do solo; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; MO: Matéria orgânica; CTC: Capacidade de troca catiônica; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; P: Fósforo; e PST: Percentagem de sódio trocável.

2.2.2 Caracterização química das diluições de efluente da aquicultura em água de abastecimento

A cada dois meses coletou-se amostras de cada diluição em garrafas plásticas que foram levadas ao Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (CCA-UFERSA) onde se procederam as análises químicas para a caracterização das águas das diluições do efluente da aquicultura em água de abastecimento. Os atributos avaliados foram: Amônio (NH₄⁺), Nitrato (NO₃⁻), Potencial hidrogeniônico em água (pH), Condutividade elétrica (CE), Potássio (K⁺), Sódio (Na⁺), Cálcio (Ca²⁺), Magnésio (Mg²⁺), Cloreto (Cl⁻), Carbonato (CO₃²⁻), Bicarbonato (HCO₃⁻) e Fósforo (P) para posteriormente cálculo da Razão de adsorção de sódio (RAS), Dureza, cátions e ânions. As médias dos atributos caracterizados estão dispostas na Tabela 2.

Tabela 2. Médias dos valores da caracterização química das diluições de efluente da aquicultura em água de abastecimento, Mossoró-RN.

ID	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	P	pH	CE	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	RAS	Dureza	Cátions	Ânions
	mg L ⁻¹			H ₂ O	dS m ⁻¹			mmolc L ⁻¹						mg L ⁻¹	mmolc L ⁻¹	
D1	2,0	3,6	0,00	8,6	0,5	2,0	3,3	0,7	1,1	2,6	0,5	3,0	3,5	91,3	7,1	6,1
D2	7,0	2,1	0,54	7,6	1,9	0,6	7,6	2,3	4,3	0,8	0,0	4,1	4,4	331,5	14,8	9,9
D3	12,7	4,1	1,15	7,4	2,9	1,0	12,8	4,7	8,3	0,6	0,0	4,9	5,6	652,0	26,9	14,5
D4	14,4	4,7	2,03	7,5	4,0	1,3	15,9	6,4	10,8	0,6	0,0	7,0	6,9	860,5	36,4	20,0
D5	16,7	2,5	2,31	7,5	4,8	1,5	19,3	8,0	12,4	0,8	0,0	8,1	6,6	1018,0	38,8	28,2

ID: Identificação; NH₄⁺: Amônio; NO₃⁻: Nitrato; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; P: Fósforo; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; Cl⁻: Cloreto; CO₃²⁻: Carbonato; HCO₃⁻: Bicarbonato; RAS: Razão de adsorção de sódio; D1: Diluição 1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura ; D2: Diluição 2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; D3: Diluição 3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; D4: Diluição 4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e D5: Diluição 5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

As diluições 4 e 5 não se enquadram nos padrões exigidos pela resolução do COEMA Nº 2/2017 devido suas concentrações elevadas de nitrogênio, magnésio, fósforo e condutividade elétrica.

2.3 Coleta e preparo das amostras de solo

Foram coletadas amostras de solo de estrutura deformada e indeformada, na área de estudo e em uma área de mata nativa próximo ao experimento, para a realização das análises físico-hídricas e químicas.

As amostras de estrutura indeformada foram coletadas com a utilização de anéis volumétricos de altura e diâmetro médio de 0,03 e 0,05 m, respectivamente, nas cinco diluições e nas cinco repetições e em área de mata nativa nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, sendo dois anéis por profundidade, totalizando 120 amostras. Essas, foram revestidas com papel alumínio, identificadas e levadas ao laboratório para a realização das análises: curva de retenção de água no solo (macroporosidade, microporosidade, porosidade total, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível) e densidade do solo.

Foram coletadas amostras de solo com estrutura deformadas com o auxílio de um trado tipo holandês, duas amostras em cada unidade experimental, sendo uma em cada profundidade (0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m) dos cinco tratamentos e das cinco repetições, totalizando 60 amostras colocadas em sacos plásticos, identificadas e levadas ao Laboratório para o beneficiamento e posterior análises. Após isso, as mesmas foram secas ao ar, destorroadas e passadas em uma peneira de 2 mm para obtenção a terra fina seca ao ar (TFSA). Essa foi usada para realização das análises físicas e químicas.

As análises foram realizadas no complexo de Laboratórios de Análise de Solo, Água e Planta do Centro de Ciências Agrárias da Ufersa (LASAP-CCA-Ufersa), seguindo a metodologia de Teixeira *et al.* (2017).

2.4 Análises físico-hídricas e estruturais

2.4.1 Curva de retenção de água no solo

Para a determinação da curva de retenção de água no solo, anéis contendo amostras com estrutura indeformada, coletadas na área de estudo, foram submetidas a tensões de 0; 2; 6; 10; 33; 100, 200, 300, 500 e 1500 kPa sendo que para as tensões de 0; 2; 6, 10 e 33 kPa foi utilizada mesa de tensão. Já as tensões de 100, 200 e 300 kPa utilizou-se câmaras de Richards de média tensão e para 500 e 1500 kPa, câmaras de alta tensão. As amostras permaneceram sob tensão

até quando não mais se observou drenagem de água (equilíbrio). Para realização do ajuste das curvas de retenção de água no solo, foi utilizado o software Soil Water Retention Curve (SWRC) desenvolvido por Dourado Neto *et al.* (2001), com base na equação de van Genuchten (1980).

A equação considera a umidade volumétrica (θ) como variável dependente e o potencial mátrico (ϕ_m), como variável independente, como segue:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + (\alpha \times |\phi_m|^n)^m]}$$

Em que: θ_r é a umidade volumétrica residual ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); θ_s é a umidade volumétrica saturada ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); $|\phi_m|$ é o potencial mátrico (kPa); e α , m e n são parâmetros empíricos da equação.

Por se tratar de um parâmetro teórico que tem a possibilidade de se apresentar entre 10 e 33 kPa, o valor da capacidade de campo (CC) foi definido na tensão de 10 kPa que representa a condição de solos arenosos. A obtenção do ponto de murcha permanente (PMP) foi feita sob tensão de 1500 kPa. A água disponível foi determinada pela diferença entre PMP e CC. A condutividade hidráulica relativa estimada (K_r) por meio dos parâmetros da curva de retenção de água no solo, utilizando o programa Retc, conforme van Genutchen *et al.* (1980) (van Genuchten; Leij; Yates, 1991.)

2.4.2 Macroporosidade, microporosidade e porosidade total

Para a determinação da macro, micro e porosidade total (Pt), os anéis volumétricos contendo as amostras indeformadas foram colocados em uma bandeja e saturados por 48 horas e, após esse período, pesados para se obter a porosidade total. Depois disso, as amostras foram acondicionadas em uma mesa de tensão e saturadas com água de forma que ficaram sem bolhas de ar na coluna sob uma tensão de 6 kPa para se obter a microporosidade. As amostras permaneceram sob tensão por um período de 24 horas até o equilíbrio.

A Pt foi determinada mediante medição da umidade de saturação das amostras, de acordo com a equação:

$$Pt = \frac{(Msat - Ms)}{Vt} \times 100$$

Em que: Msat é a massa do solo saturado; Ms é a massa do solo seco; e VT é o volume da amostra.

A microporosidade do solo foi determinada pelo conteúdo de água retida no solo para o valor de h igual a 60 cm de água, conforme a equação:

$$\text{Micro} = \frac{(M_{60\text{cm}} - M_s)}{V_t} \times 100$$

Em que: $M_{60\text{cm}}$ é a massa das amostras para h igual a 60 cm de coluna de água.

A macroporosidade do solo foi obtida pela diferença entre a P_t e a microporosidade.

2.4.3 Densidade do solo

A densidade do solo (D_s) foi determinada pelo método do anel volumétrico, utilizando-se anéis com 100 cm^3 de volume calculando-se a relação entre massa de solo seco em estufa a 105°C e volume total do anel, utilizando a expressão:

$$D_s = \frac{M_s}{V_t}$$

Em que: D é a densidade do solo (g/cm^3); M_s é a massa de solo seco em estufa a 105°C (g); e V_t é o volume total do anel (cm^3) (Teixeira *et al.*, 2017).

2.4.4 Análise granulométrica, argila dispersa em água e índice de floculação

A análise granulométrica foi feita pelo método da pipeta conforme Teixeira *et al.* (2017). Assim, foram adicionados 20 g de terra fina seca ao ar, água destilada e um dispersante químico (Hexametáfosfato de sódio) em uma garrafa plástica e feita agitação mecânica em um agitador tipo Wagner a 50 rpm por um período de 16 horas. A fração argila ($< 0,002\text{mm}$) foi obtida por sedimentação, a areia (0,05 a 2 mm) por tamisação e o silte (0,002 a 0,05) pela diferença entre as duas frações anteriores.

A argila dispersa em água (ADA) foi estimada por meio dos mesmos procedimentos anteriores com a diferença da não utilização do dispersante químico (hexametáfosfato de sódio), conforme Teixeira *et al.* (2017).

Calculou-se o índice de floculação pela seguinte equação, de acordo com o mesmo autor anteriormente citado:

$$IF = \frac{(\text{argila total} - \text{argila dispersa em água})}{\text{argila total}} \times 100$$

2.4.5 Agregados

A análise de agregados foi realizada conforme Teixeira *et al.* (2017) na qual iniciou com a coleta de amostras de solo em blocos feita com a utilização de uma pá de corte reta. Os blocos coletados foram peneirados simultaneamente em duas peneiras com abertura de malha de 4,00 e 2,00 mm. Os agregados que ficaram retidos na peneira de 2,00 mm foram identificados, colocados em potes de plástico e fechados para não perderem umidade. O método utilizado foi o peneiramento via úmido, no qual duas amostras de 25 g cada são umedecidas e transferidas para um conjunto de quatro peneiras com os seguintes diâmetros de malha: 2,00; 1,00; 0,50; e 0,25 mm. Essas foram colocadas em um oscilador vertical (42 oscilações por minuto) contendo água para que seja feita a separação dos agregados e em seguida as amostras foram secas em estufa a 105°C e pesadas para obtenção da massa seca. Após isso, a fração areia foi separada dos agregados por peneiramento após agitação das amostras com dispersante químico (hexametáfosfato de sódio) e água destilada por dois minutos em um agitador tipo Wagner.

Para realizar a estimativa do diâmetro médio ponderado (DMP), o teor de agregados em cada peneira foi expresso em quatro classes de diâmetro de agregados: 4,76-2,00; 2,00-1,00; 1,00-0,50; e 0,50-0,25 mm, obtido pela equação:

$$DMP = \sum_{i=1}^N X_i \times W_i$$

O diâmetro médio ponderado (DMP) foi calculado pelo somatório do produto entre a proporção em massa (W_i) de determinado tamanho de fração e o diâmetro médio (X_i) dessa fração.

2.5 Análises químicas

Utilizou-se Terra Fina Seca Ar (TFSA) para a realização das seguintes análises químicas: potencial hidrogeniônico (pH) em água, condutividade elétrica (CE) em água, teores de cálcio trocável (Ca^{2+}) e magnésio trocável (Mg^{2+}) utilizando extrator cloreto de potássio, sódio (Na^+) e potássio (K^+) com extrator duplo ácido e determinados por espectrofotômetro de chama, acidez potencial (H+Al) utilizando de acetato de cálcio, carbono orgânico total (COT) pelo método da digestão da matéria orgânica e fósforo (P) por colorimetria (Teixeira *et al.*, 2017).

A partir dos valores obtidos para Na^+ e K^+ foram calculadas a percentagem de sódio trocável (PST) e a razão de adsorção de sódio (RAS). Após todas as análises foram calculadas a capacidade de troca de cátions (CTC), soma de bases (SB) e saturação por bases (SB), para

discussão de acordo com Teixeira *et al.*, (2017) e interpretados conforme Manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães, 1999).

2.6 Coleta e análise dos macroartrópodes do solo

Para o estudo dos macroartrópodes foram instaladas 30 armadilhas de queda tipo provid, em transecto cruzado ($n=30$), espaçadas a uma distância de 1 m (Giracca *et al.*, 2003) na área experimental, dispostas nas parcelas nos meses de junho de 2022 e agosto de 2023, período chuvoso e seco, respectivamente. Além disso, foram instaladas ainda seis armadilhas em uma área de mata localizada próximo ao experimento para referência.

As armadilhas (Figura 4A) consistiram em garrafas plásticas com capacidade de dois litros, possuindo quatro orifícios de 4 cm² de área localizados a uma altura de 15 cm da base da garrafa. Essas foram armadas no solo contendo 100 ml de uma solução de água, álcool (70%) e detergente nas proporções de 40,0, 40,0 e 20,0 ml, respectivamente, as quais foram mantidas no local por 72 horas, conforme Almeida *et al.* (2015). Decorrido esse período, as armadilhas foram levadas ao laboratório, no qual os macroartrópodes foram retirados, com auxílio de uma peneira de 0,25 mm, classificados de acordo com sua ordem (grupo taxonômico) e quantificados (Figura 4B).



Fonte: Araújo (2023).

Figura 4. Armadilhas instaladas na área experimental (A); Contagem dos macroartrópodes em laboratório (B).

Após isso, foram feitos cálculos de abundância e frequência (relativa e absoluta) utilizando os índices ecológicos de Shannon (H), definido pela equação:

$$H = (H = - \sum p_i \times \log p_i)$$

Em que: p_i é igual a n_i/N ; n_i é a densidade de cada grupo; e N é o somatório da densidade de todos os grupos.

Também calculou-se o índice de dominância de Simpson (S), definido pela expressão:

$$S = \sum \left(\frac{n_i}{N}\right)^2$$

Em que: n_i é o número de indivíduos do grupo; e N é o somatório da densidade de todos os grupos.

2.7 Análise estatística

Os resultados médios referentes as mesmas variáveis estudadas, também foram interpretados por meio da técnica estatística multivariada. Foi construída a matriz de correlação de correlação de Pearson ($p \leq 0,05$) a qual foi utilizada como base para realização posterior da análise fatorial (AF) e componentes principais (ACP), utilizando o Software Statistica 14.0 (Statsoft Inc, 2020).

Os resultados obtidos referentes as variáveis físico-hídricas, estruturais, químicas e os macroartrópodes foram interpretados por meio da realização da análise da variância para dar sequência ao teste de comparação de médias de Tukey ($p < 0,05$) utilizando o software Sisvar (Ferreira, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Matriz de correlação

A matriz apresentou um número de correlações positivas maior que as negativas para as variáveis estruturais, inorgânicas, biológicas e químicas sendo as principais listadas a seguir. O nitrogênio (N) correlacionou-se positivamente com condutividade elétrica (CE), matéria orgânica (Mat. Org.), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), acidez potencial (H^+Al) e capacidade de troca catiônica (CTC), e negativamente com a saturação por bases (V) (Tabela 5). Isso está

relacionado a contribuição da matéria orgânica para a fertilidade do solo, principalmente em relação nitrogênio, pois o suprimento deste elemento químico é dependente do conteúdo e composição química da matéria orgânica do solo (Bu *et al.*, 2024).

Zhang *et al.* (2023) encontraram correlações semelhantes aos nossos achados no que se refere ao nitrogênio total e a matéria orgânica e a contribuição dessa para a fertilidade do solo.

O pH teve correlação positiva com a V em função do regime de chuvas do semiárido ser baixo, reduzindo a lixiviação das bases trocáveis para as camadas mais profundas do solo, apesar de se tratar de um solo arenoso, nas duas camadas estudadas (Yang *et al.*, 2020).

O sódio (Na^+), percentagem de sódio trocável (PST), V e Densidade do solo (Ds) correlacionaram-se negativamente com o índice de floculação (IF), diâmetro médio ponderado (DMP) e porosidade total (Pt). A CE positivamente com a COT, Ca^{2+} , (H+Al) e CTC e negativamente com V. O COT apresentou as mesmas correlações positivas da CE além da CC (capacidade de campo) e negativa com a densidade do solo (Ds) (Tabela 5). Isso mostra a interferência negativa da elevação da PST e Ds nas variáveis ligadas a estrutura do solo, agregação, aeração e permeabilidade de água. Uma vez que as variáveis estruturais são afetadas quando há um excesso de sódio trocável no complexo de troca em relação às outras bases trocáveis como Ca^{2+} e Mg^{2+} (Paz *et al.*, 2020; Singh *et al.*, 2023).

Tabela 3. Matriz de correlação linear de Pearson entre os atributos inorgânicos, biológicos e químicos e hídricos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

	N	pH	CE	COT	P	K+	Na+	Ca2+	Mg2+	(H+Al)	SB	CTC	V	PST	Argila	Silte	Areia	IF	DMP	H' (C)	H' (S)	e (C)	e (S)	S (C)	S (S)	Pt (%)	Micro	Macro	Ds	CC	PMP	AD	Kr
N	1,00																																
pH	-0,50	1,00																															
CE	0,94	-0,59	1,00																														
COT	0,93	-0,63	0,91	1,00																													
P	0,36	-0,76	0,47	0,58	1,00																												
K+	0,90	-0,29	0,79	0,73	0,03	1,00																											
Na+	-0,11	0,77	-0,16	-0,20	-0,35	-0,10	1,00																										
Ca2+	0,99	-0,45	0,90	0,92	0,29	0,92	-0,09	1,00																									
Mg2+	-0,53	0,51	-0,45	-0,53	-0,18	-0,66	0,61	-0,54	1,00																								
(H+Al)	0,90	-0,53	0,83	0,93	0,54	0,67	-0,03	0,89	-0,31	1,00																							
SB	0,79	-0,15	0,73	0,70	0,21	0,60	0,36	0,78	0,09	0,83	1,00																						
CTC	0,84	-0,27	0,78	0,78	0,30	0,64	0,25	0,84	-0,01	0,90	0,99	1,00																					
V	-0,70	0,86	-0,67	-0,82	-0,76	-0,44	0,48	-0,68	0,46	-0,84	-0,45	-0,58	1,00																				
PST	-0,59	0,89	-0,60	-0,62	-0,51	-0,48	0,82	-0,57	0,58	-0,55	-0,24	-0,34	0,79	1,00																			
Argila	0,20	0,64	0,08	-0,08	-0,66	0,43	0,62	0,23	0,14	-0,04	0,40	0,29	0,51	0,41	1,00																		
Silte	0,61	-0,49	0,64	0,58	0,19	0,72	-0,51	0,60	-0,87	0,37	0,08	0,15	-0,44	-0,57	-0,08	1,00																	
Areia	-0,61	-0,06	-0,55	-0,39	0,31	-0,86	-0,03	-0,63	0,58	-0,26	-0,33	-0,32	-0,01	0,16	-0,63	-0,72	1,00																
IF	0,28	-0,78	0,24	0,39	0,60	0,17	-0,77	0,27	-0,45	0,34	-0,02	0,10	-0,69	-0,80	-0,55	0,36	0,10	1,00															
DMP	0,21	-0,84	0,32	0,40	0,73	0,04	-0,75	0,15	-0,49	0,30	-0,20	-0,07	-0,70	-0,69	-0,82	0,49	0,19	0,69	1,00														
H' (C)	-0,02	0,12	-0,02	-0,02	-0,24	-0,03	0,02	-0,02	-0,12	0,03	-0,11	-0,09	0,00	0,11	-0,18	0,15	0,01	-0,38	0,08	1,00													
H' (S)	0,27	0,06	0,35	0,22	0,03	0,36	0,17	0,28	-0,26	0,20	0,15	0,15	-0,06	0,09	0,05	0,57	-0,48	-0,23	0,07	0,43	1,00												
e (C)	-0,35	0,17	-0,28	-0,25	-0,11	-0,41	0,05	-0,36	0,11	-0,19	-0,34	-0,33	0,11	0,28	-0,42	-0,08	0,35	-0,37	0,15	0,90	0,37	1,00											
e (S)	0,04	0,10	0,15	0,04	0,06	0,10	0,16	0,04	-0,10	0,04	-0,02	-0,02	0,01	0,18	-0,11	0,41	-0,24	-0,23	0,10	0,43	0,96	0,48	1,00										
S (C)	0,52	-0,01	0,56	0,39	-0,01	0,65	0,13	0,53	-0,38	0,36	0,35	0,35	-0,14	-0,07	0,28	0,69	-0,73	-0,15	-0,01	0,26	0,93	0,07	0,80	1,00									
S (S)	0,08	0,10	0,13	0,11	-0,10	0,04	0,15	0,06	-0,15	0,11	-0,04	-0,03	-0,01	0,19	-0,12	0,20	-0,07	-0,44	0,12	0,91	0,46	0,83	0,42	0,30	1,00								
Pt (%)	0,56	-0,90	0,57	0,74	0,73	0,30	-0,59	0,55	-0,45	0,71	0,30	0,43	-0,96	-0,81	-0,62	0,40	0,12	0,70	0,77	0,00	-0,06	-0,06	-0,10	-0,02	-0,02	1,00							
Micro	0,37	-0,36	0,47	0,57	0,38	0,18	-0,14	0,35	-0,34	0,31	0,16	0,20	-0,30	-0,20	-0,16	0,27	-0,10	0,05	0,23	-0,07	-0,11	-0,12	-0,19	-0,06	0,12	0,41	1,00						
Macro	0,20	-0,53	0,12	0,19	0,35	0,12	-0,44	0,21	-0,13	0,40	0,14	0,23	-0,64	-0,59	-0,45	0,14	0,20	0,62	0,52	0,07	0,04	0,04	0,08	0,04	-0,12	0,59	-0,50	1,00					
Ds	-0,63	0,94	-0,64	-0,78	-0,81	-0,40	0,66	-0,60	0,56	-0,70	-0,29	-0,42	0,95	0,87	0,59	-0,53	0,00	-0,82	-0,79	0,10	-0,03	0,18	0,03	-0,11	0,08	-0,93	-0,37	-0,55	1,00				
CC	0,73	-0,56	0,64	0,67	0,48	0,70	-0,35	0,72	-0,52	0,63	0,47	0,54	-0,62	-0,67	0,06	0,52	-0,44	0,61	0,31	-0,52	0,07	-0,70	-0,07	0,32	-0,51	0,53	0,17	0,35	-0,67	1,00			
PMP	0,40	0,26	0,40	0,31	-0,14	0,36	0,49	0,40	0,30	0,36	0,70	0,63	0,07	0,09	0,62	-0,02	-0,41	-0,23	-0,41	-0,33	0,05	-0,46	-0,07	0,24	-0,23	-0,13	0,12	-0,23	0,16	0,25	1,00		
AD	0,58	-0,67	0,50	0,56	0,55	0,57	-0,55	0,58	-0,65	0,50	0,20	0,29	-0,67	-0,72	-0,19	0,54	-0,29	0,71	0,48	-0,39	0,05	-0,53	-0,05	0,23	-0,43	0,59	0,12	0,45	-0,75	0,92	-0,15	1,00	
Kr	-0,55	-0,36	-0,36	-0,32	0,36	-0,73	-0,44	-0,58	0,24	-0,36	-0,52	-0,48	-0,09	-0,14	-0,82	-0,26	0,77	0,26	0,46	0,08	-0,20	0,39	0,04	-0,44	-0,05	0,26	0,04	0,81	-0,19	-0,33	-0,58	-0,11	1,00

N: Nitrogênio; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; Mat. Org.: Matéria orgânica; P: Fósforo; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; (H+Al): Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; PST: Percentagem de sódio trocável; IF: índice de floculação; DMP: Diâmetro médio ponderado; H' (C): índice ecológico de Shannon no período chuvoso; H' (S): índice ecológico de Shannon no período seco; e (C): índice ecológico de Pielou no período Chuvoso; e (S): índice ecológico de Pielou no período seco; S (C): índice ecológico de Simpson no período chuvoso; S (S): índice ecológico de Simpson no período chuvoso; Pt: Porosidade total; Micro: Microporosidade; Macro: Macroporosidade; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; AD: Água disponível. Kr: Condutividade hidráulica relativa. Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; b) Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; c) Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; d) Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e e) Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

O P apresentou correlação positiva com DMP e Pt e negativamente com V, argila e Ds. O K^+ positivamente com o Ca^{2+} , (H+Al), silte e CC e negativamente com o Mg^{2+} e areia. A (H+Al) e o Ca^{2+} positivamente com SB e CTC e negativamente com V. O Mg^{2+} e areia negativamente apenas com o silte. A argila negativamente com o DMP. O IF positivamente com a Pt e AD e negativamente com a Ds. O DMP positivamente com Pt e negativamente com Ds. Os índices de diversidade de Shannon (H'), Pielou (e) e Simpson (S) correlacionaram-se entre si nos dois períodos estudados (chuvoso e seco), assim como CC e AD (água disponível) (Tabela 3).

Dawes e goonetilleke (2005) avaliaram o comportamento do solo após irrigação com efluente, encontraram correlações semelhantes no que diz respeito as variáveis relacionadas a CE, PST, Ca^{2+} , Mg^{2+} e CTC, no qual correlaciona essas variáveis às frações granulométricas do solo, estrutura e à irrigação com efluentes.

3.2 Análise fatorial

Por meio da análise fatorial, que contou com 33 variáveis, ocorreu a formação de 5 fatores. O fator 1 (F1) agrupou as variáveis químicas e físico-hídricas Nitrogênio (N), Condutividade elétrica (CE), Carbono orgânico total (COT), Cálcio (Ca^{2+}), Acidez potencial (H+Al), Soma de bases (SB) e capacidade de troca catiônica (CTC), Ponto de murcha permanente (PMP) e Condutividade hidráulica relativa (Kr), contribuindo com 39,91% da variância total, sendo o responsável pela maioria da explicação dos resultados obtidos (Tabela 4). Isso destaca a importância da matéria orgânica na contribuição com a fertilidade do solo, principalmente no aporte de nitrogênio (Cheng *et al.*, 2023), e modificação da capacidade de troca de catiônica (Cotrufo; Lavallee, 2022).

A matéria orgânica possui vários benefícios ao solo como melhoria da estrutura, por meio da agregação, favorece a retenção de água no solo, aumenta a atividade microbiana e biomassa além de fornecer nutrientes às plantas, substituindo total ou em parte o uso de fertilizantes químicos (Bonanomi *et al.*, 2020).

O fator 2 (F2) reuniu variáveis químicas como Potencial hidrogeniônico (pH), Fósforo (P), Sódio (Na^+), Saturação por bases (V) e Percentagem de sódio trocável (PST), inorgânicas (Argila) e estruturais Índice de floculação (IF), Diâmetro médio ponderado (DMP), Porosidade total (Pt), Macroporosidade (Macro) e Densidade do solo (Ds), contribuindo com 22,45% da variância total (Tabela 4). Dessa maneira, ressalta-se a importância do estudo das relações entre os atributos ligados a sodicidade e a estrutura do solo levando em consideração o pH, para que seja evitado limitações estruturais no solo já que um aumento nas concentrações de sódio em

relação aos cátions bivalentes favorecem uma elevação da densidade do solo, redução da porosidade total e, conseqüentemente, um menor índice de floculação das argilas (Gengmao *et al.*, 2010; Singh *et al.*, 2023). Valejjos *et al.* (2020) associa o aumento na PST do solo à quantidade de sódio presente na descarga do processamento do pescado utilizada no solo.

Tabela 4. Eixos fatoriais extraídos e rotacionados pelo método Varimax cujas cargas fatoriais $\geq 0,65$ foram consideradas significativas.

Atributos	F1	F2	F3	F4	F5
N	0,78	0,32	-0,04	0,51	-0,13
pH	-0,15	-0,94	0,08	-0,12	0,12
CE	0,72	0,37	0,07	0,47	-0,17
COT	0,73	0,51	0,05	0,36	-0,26
P	0,27	0,79	0,00	-0,15	-0,03
K ⁺	0,56	0,10	-0,11	0,79	-0,04
Na ⁺	0,39	-0,79	0,15	-0,26	0,10
Ca ²⁺	0,77	0,29	-0,05	0,53	-0,11
Mg ²⁺	0,10	-0,47	-0,03	-0,80	0,24
(H+Al)	0,86	0,45	0,06	0,17	-0,02
SB	0,99	-0,02	-0,08	0,05	0,05
CTC	0,98	0,12	-0,06	0,07	0,03
V	-0,48	-0,86	-0,03	-0,09	0,00
PST	-0,19	-0,82	0,23	-0,29	0,03
Argila	0,34	-0,81	-0,29	0,33	-0,01
Silte	0,06	0,40	0,17	0,88	-0,04
Areia	-0,28	0,26	0,07	-0,91	0,04
IF	-0,04	0,83	-0,42	0,10	0,11
DMP	-0,15	0,91	0,16	0,09	-0,03
H' (C)	-0,07	-0,02	0,90	0,05	-0,02
H' (S)	0,16	-0,07	0,62	0,54	0,42
e (C)	-0,27	0,01	0,91	-0,23	0,05
e (S)	0,00	-0,04	0,65	0,35	0,51
S (C)	0,34	-0,09	0,39	0,73	0,37
S (S)	0,04	-0,07	0,92	0,09	-0,20
Pt (%)	0,34	0,90	0,02	0,01	-0,13
Micro	0,22	0,24	0,07	0,11	-0,85
Macro	0,12	0,64	-0,04	-0,09	0,63
Ds	-0,30	-0,93	0,06	-0,17	0,07
CC	0,43	0,46	-0,53	0,48	0,13
PMP	0,69	-0,42	-0,26	0,06	-0,02
AD	0,16	0,64	-0,43	0,47	0,14
Kr	-0,66	0,49	0,18	-0,54	0,03
Autovalores	13,57	7,63	4,63	3,16	1,95

Variância Total (%)	39,91	22,45	13,64	9,31	5,74
Variância Total Acumulada (%)	39,91	62,37	76,01	85,33	91,07

N: Nitrogênio; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; Mat. Org.: Matéria orgânica; P: Fósforo; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; (H+Al): Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; PST: Percentagem de sódio trocável; IF: índice de floculação; DMP: Diâmetro médio ponderado; H'(C): índice ecológico de Shannon no período chuvoso; H'(S): índice ecológico de Shannon no período seco; e (C): índice ecológico de Pielou no período Chuvoso; e (S): índice ecológico de Pielou no período seco; S (C): índice ecológico de Simpson no período chuvoso; S (S): índice ecológico de Simpson no período chuvoso; Pt: Porosidade total; Micro: Microporosidade; Macro: Macroporosidade; Ds: Densidade do solo; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; AD: Água disponível; e Kr: Condutividade hidráulica relativa.

O fator 3 (F3), com 13,64% das variações, englobou os índices ecológicos de Shannon (H') e Pielou (e) no período chuvoso, e Simpson (S) no período seco (Tabela 4). Esses índices mostram como está a saúde do solo por meio dos organismos indicadores que são os macroartrópodes. Esses organismos contribuem para a fertilidade do solo por meio da sua ação na matéria orgânica do solo e ciclagem de nutrientes. Além disso, os mesmos ainda melhoram a estrutura e aeração do solo de forma considerável através das suas atividades de bioturbação e construção de galerias, túneis e ninhos. Isso também reflete positivamente na infiltração de água no solo (Lavelle *et al.*, 2006; Olayemi *et al.*, 2022).

A propriedades físicas, químicas e biológicas das camadas superficiais do solo determinam a composição das espécies e diversidade da comunidade de macroartrópodes do solo nos agroecossistemas (Deng *et al.*, 2022), logo se as diluições do efluente da aquicultura em água de abastecimento possuem composição variada que altera as características do solo, os macroartrópodes são alterados pelo uso de diluições desse efluente.

O fator 4 (F4) contou com o Potássio (K⁺), Magnésio (Mg²⁺), Silte, Areia e Índice ecológico de Simpson (S) no período chuvoso e o fator 5 (F5) apenas com a Microporosidade (Micro), com variações de 9,31% e 5,74%, respectivamente. Essas foram as variáveis que menos explicaram os resultados encontrados devido a sua baixa modificação ao decorrer do trabalho e as baixas correlações encontradas.

Todos esses cinco fatores resultaram em uma variância total acumulada de 91,07% (Tabela 4).

3.3 Análise das Componentes Principais (ACP)

Por meio da análise das componentes principais (ACP) foi possível fazer a discriminação dos atributos do solo e diferentes diluições de efluente da aquicultura em palma forrageira. Assim, Argila, Na⁺, pH, PST, V e, em menor proporção, Mg²⁺ diferenciaram todas as diluições na camada subsuperficial (0,10-0,20m).

As variáveis Na^+ , PST e Ds explicaram fortemente os tratamentos (Diluições) em sua camada subsuperficial (0,10-0,20m), pois os valores de Na^+ , presentes nas diluições aplicadas, principalmente nas diluições 4 e 5, contribuíram para o aumento da PST do solo que no início do experimento era 0,00 % e aumentou para valores superiores a 2,00 % em apenas 1 ano e meio de experimento. Apesar dos valores de Na^+ presentes nas diluições do efluentes da aquicultura em água de abastecimento serem baixos (Tabela 2), sua deposição constante no solo pode ter sido o responsável pelo aumento nos valores de percentagem de sódio trocável (PST), que tanto do ponto de vista agrônômico quanto da conservação do solo, são ruins (Ribeiro; Guimarães, 1999).

Gengmao *et al.* (2010) estudaram a utilização de efluentes da aquicultura na irrigação de alcachofra de Jerusalém, observou que a irrigação com efluente que contenha concentrações elevadas de sódio provoca sodicidade no solo, degradando suas propriedades físicas, pois o sódio em altas quantidades em relação aos cátions bivalentes, causa a dispersão das argilas e, conseqüentemente, a redução dos agregados e perda da funcionalidade estrutural do solo.

Os valores de densidade do solo foram superiores em profundidade principalmente nas diluições, sendo explicado pelo fato da classe de solo estudada se tratar de um Argissolo no qual seus constituintes minerais são compostos por matérias de altas densidades como os óxidos de ferro e alumínio, contribuindo assim, para uma elevação da densidade do solo (Al-Shammary *et al.*, 2018).

O pH do solo foi influenciado por todas as diluições, mas principalmente pelas diluições 1 e 2 que apresentaram os maiores valores ao final do experimento, mesmo não apresentando diferença estatística significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) em relação aos outros tratamentos. Isso pode ser explicado tanto pela natureza alcalina dos efluentes e da água de abastecimento quanto pela adição de cátions básicos ao solo advindos das diluições do efluente da aquicultura. Wu *et al.* (2020) associaram a redução do pH do solo à altas perdas de cátions básicos, seja pela remoção pelas culturas ou alta precipitação pluvial.

Com relação aos teores de Mg^{2+} no solo, esse foi fortemente influenciado pelos teores de Mg^{2+} presente na água das diluições que tiveram valores crescentes da 1 para a 5 (Tabela 2).

Os índices ecológicos de Shannon (H'), Pielou (e) e Simpson (S), N , K^+ , Ca^{2+} , CE, SB, CTC, ($H+Al$), COT, Silte, CC e, em menor proporção, microporosidade discriminaram a mata nativa (Figura 5).

O N discriminou a mata nativa pois esses valores foram expressivos (Tabela 8), em especial na camada superficial (0,00-0,10m), quando comparada aos tratamentos. Isso aconteceu devido a quantidade de carbono orgânico advindo da serrapilheira acumulada na camada

superficial do solo durante anos de produção de biomassa vegetal que, após a decomposição, liberam esse nutriente ao solo (Zhao *et al.*, 2023).

As bases trocáveis Ca^{2+} e K^+ discriminaram a mata nativa em função do clima da região, no qual é caracterizado por baixa precipitação pluvial que pouco lixiviam essas bases (Wu *et al.*, 2020).

Bato *et al.* (2020) destacaram que os maiores valores de Nitrogênio, bases trocáveis, SB e CTC são encontrados em ambiente de mata nativa, quando comparados a outros usos da terra como ambientes cultivados.

Os índices ecológicos de Shannon (H'), Pielou (e) e Simpson discriminaram a mata nativa, pois nesta se apresentaram os maiores números de macroartrópodes do solo e a terceira maior diversidade desses indivíduos quando comparada com os tratamentos (Tabela 9). Esses índices se referem, conjuntamente, aos eventos ambientais que aconteceram ao longo da história de um ecossistema e os macroartrópodes são os elementos responsáveis por fornecer informações atualizadas sobre esses eventos (Herrera *et al.*, 2023). Isso nos mostra a importância da manutenção de ambientes preservados que contenham serapilheira e um maior aporte de matéria orgânica, visto que a quantidade desses indivíduos é facilmente alterada quando há modificações no ambiente, sejam elas boas ou ruins (Lopez *et al.*, 2019).

Microporosidade e PMP, também, definiram a mata nativa pois são variáveis ligadas as forças capilares e de adsorção (Klein; Libardi, 2002; Pires *et al.*, 2019) que foram maiores no ambiente de mata nativa evidenciados pela curva de retenção de água no solo da mesma (Figura 7F).

AD, Pt, P, macroporosidade, IF, DMP e areia discriminaram as diluições (D1, D2, D3 e D5) na camada superficial (0,00-0,10m). Assim como, o índice ecológico $e(C)$ discriminou D4 na mesma camada.

A discriminação das diluições por essas variáveis aconteceu em função dos maiores valores dos atributos físico-hídrico do solo. Assim, ressalta-se a contribuição das diluições aliada à diversidade da macrofauna para melhorar a porosidade do solo em superfície, refletindo na água disponível para as plantas e na condutividade hidráulica do solo, pois solos que possuem uma porosidade maior apresentam maior condutividade hidráulica, assim como infiltra mais água no solo reduzindo o escoamento superficial e, conseqüentemente, a erosão do solo (Kool *et al.*, 2019). Nossos achados evidenciam tal afirmativa pela correlação positiva encontrada entre a condutividade hidráulica relativa (K_r) e a fração areia (Tabela 3).

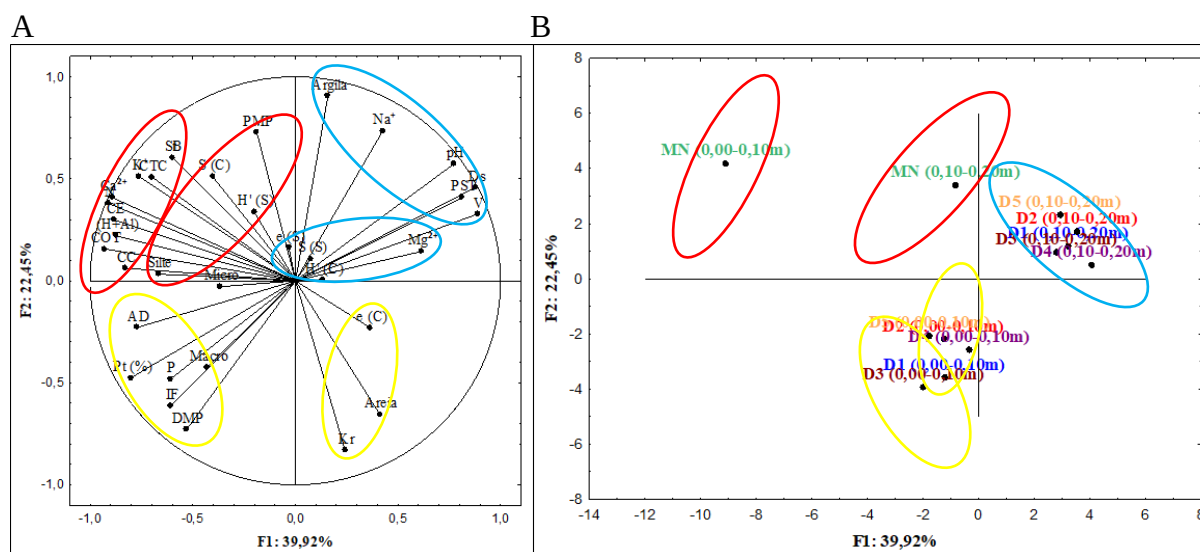


Figura 5. Distribuição das variáveis no círculo de correlações (A) e distribuição da nuvem de pontos (B) que representa a relação entre os fatores 1 e 2.

Em se tratando dos atributos físicos e estruturais do solo foi possível observar que a granulometria contou com proporções das frações granulométricas semelhantes, com predominância da areia para todas as diluições assim como na mata nativa. Assim, a Argila variou entre 38 e 81 g.kg⁻¹ sendo os maiores valores na camada subsuperficial (0,10-0,20m) com destaque para a mata nativa (MN). Os teores de silte se apresentaram entre 83 e 129 g.kg⁻¹ com os maiores valores na camada superficial (0,00-0,10m) das diluições e subsuperficial da mata nativa. Com relação a densidade do solo (Ds), os valores foram menores na camada superficial sem variações expressivas se destacando a mata nativa e o mesmo se repetiu para a outra camada estudada. Os valores de porosidade total foram inversamente proporcionais à Ds, assim como a macroporosidade, exceto para a diluição D2, que apresentou uma microporosidade superior tanto a macroporosidade quanto às demais diluições. Já o índice de floculação (IF), foi maior na camada superficial com destaque para a diluição D3 que apresentou um índice de 28,29%. O diâmetro médio ponderado seguiu a mesma tendência do IF, sendo as diluições D2 e D4 superiores às demais (Tabela 5).

Tabela 5: Médias dos atributos físicos e estruturais dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Tombagem com evidentes da agricultura e mata nativa, Mossoró RN.																				
Camadas		Argila		Silte		Areia		Ds		Micro		Macro		Pt		IF		DMP		
m						g.kg								%				Mm		
Diluição D1**																				
0,00-0,10		38	a1	108	a1	854	a1	1,41	a1	14,38	29,27	a5	43,66	a1	14,27	a1	a2	1,99	a1	a2
0,10-0,20		59	a1	101	a1	a2	840	a2	1,63	a1	13,18	21,63	a6	34,81	a1	6,46	a3	1,28	a1	

Diluição D2**											
0,00-0,10	40	a1	112	a1	848	a1	1,41	a1	30,81	12,95	a1
0,10-0,20	64	a1	83	a1	853	a2	1,64	a1	12,38	20,65	a5
0,00-0,10	46	a1	97	a1	857	a1	1,37	a1	15,10	28,60	a4
0,10-0,20	70	a1	77	a1	853	a2	1,63	a1	19,58	16,38	a2
0,00-0,10	43	a1	102	a1	855	a1	1,47	a1	14,66	29,91	a6
0,10-0,20	60	a1	86	a1	854	a2	1,62	a1	17,81	15,98	a1
0,00-0,10	45	a1	108	a1	847	a1	1,41	a1	16,03	23,24	a2
0,10-0,20	66	a1	88	a1	846	a2	1,65	a1	14,49	19,43	a4
0,00-0,10	68	a1	116	a1	817	a1	1,31	a1	21,69	25,75	a3
0,10-0,20	81	a1	129	a2	790	a1	1,60	a1	16,07	17,12	a3

Ds: Densidade do solo; Micro: Microporosidade; Macro: macroporosidade; Pt: Porosidade total; Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura. **Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

3.4 Atributos químicos do solo

A tabela a seguir mostra a caracterização química (médias) do solo nas camadas estudadas, na qual observa-se que não houve variações expressivas no teor de nitrogênio (N) entre as diluições, com a diluição D2 apresentando o maior teor, porém inferior a mata nativa. O potencial hidrogeniônico (pH), de maneira geral, não teve variações expressivas entre as diluições, se mantendo próximo a neutralidade com tendência a alcalinidade, assim como na mata nativa. A condutividade elétrica (CE), seguiu a mesma tendência do pH. Já o aporte de Carbono Orgânico Total (COT) foi alto para todas as diluições, sendo superior para a diluição D2, porém aproximadamente metade do encontrado na mata nativa. As maiores concentrações de fósforo (P) foram obtidas nas diluições D1 e D5. Quanto ao potássio (K⁺), todas as diluições apresentaram valores baixos, diferente da mata nativa que apresentou bons valores. Nenhuma diluição apresentou restrições com relação ao sódio (Na⁺), com valores semelhantes entre si e a mata nativa (Tabela 6A) com interpretação dos resultados conforme manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães, 1999).

Tabela 6A. Médias dos atributos químicos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Camada	N	pH	CE	COT	P	K ⁺	Na ⁺
M	g/kg	H ₂ O	dS/m	g/kg		mg/dm ³	
Diluição D1**							
0,00-0,10	0,61 a1	6,9 a1	0,06 a1	4,33 a1	31,7 a1	19,9 a1	13,0 a1
0,10-0,20	0,32 a1	7,7 a1	0,04 a1	1,07 a1	18,4 a1	13,7 a1	19,5 a1 a2
Diluição D2**							
0,00-0,10	0,80 a1	6,9 a1	0,09 a1	10,0 a2	34,4 a1	16,5 a1	13,9 a1
0,10-0,20	0,48 a1	7,6 a1	0,05 a1	1,47 a1	26,5 a1	13,4 a1	26,0 a2
Diluição D3**							
0,00-0,10	0,70 a1	6,8 a1	0,06 a1	5,10 a1	29,8 a1	18,6 a1	8,5 a1
0,10-0,20	0,46 a1	7,5 a1	0,05 a1	1,38 a1	21,5 a1	14,1 a1	20,3 a1 a2
Diluição D4**							
0,00-0,10	0,71 a1	6,9 a1	0,07 a1	4,70 a1	24,0 a1	17,9 a1	11,6 a1
0,10-0,20	0,46 a1	7,6 a1	0,05 a1	1,48 a1	17,8 a1	13,0 a1	18,6 a1 a2
Diluição D5**							
0,00-0,10	0,77 a1	6,9 a1	0,09 a1	5,39 a1	36,1 a1	19,0 a1	11,8 a1
0,10-0,20	0,50 a1	7,4 a1	0,07 a1	0,87 a1	21,5 a1	12,8 a1	22,6 a1 a2
Mata Nativa**							
0,00-0,10	2,11 a2	6,9 a1	0,15 a2	19,65 a3	52,6 a1	56,1 a2	19,3 a2
0,10-0,20	1,08 a2	7,4 a1	0,09 a1	4,60 a2	14,1 a1	49,4 a2	14,5 a1

N: Nitrogênio; pH: Potencial hidrogeniônico; CE: Condutividade elétrica; Mat. Org.: Matéria orgânica; P: Fósforo; K⁺: Potássio; Na⁺: Sódio; Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

**Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

De maneira geral, as diluições apresentaram altos valores de cálcio (Ca²⁺), com destaque para a diluição D2 e mata nativa. Os teores de magnésio (Mg²⁺) se manifestaram de forma crescente entre as diluições, todos muito altos, com a mata nativa sendo inferior. Tanto o solo das diluições quanto o da mata nativa não apresentaram alumínio (Al³⁺) e apresentaram acidez potencial (H+Al) somente na camada superficial, porém muito baixa. A soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions (CTC) foi média para todas as diluições, sendo maior na mata nativa seguida da diluição D5 e a saturação por bases (V) apresentou caráter eutrófico (V≥50%) em todas as diluições e mata nativa (Tabela 6B) com interpretação dos resultados conforme manual de recomendações para uso de corretivos e fertilizantes de Minas Gerais (Ribeiro; Guimarães, 1999).

Tabela 6B: Médias dos atributos químicos dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Camada	Ca ²⁺		Mg ²⁺		Al ³⁺		(H+Al)		SB		CTC		V		PST	
M	cmolc/dm ³														%	
Diluição D1**																
0,00-0,10	2,6	a1	1,5	a1	0,0	a1	0,4	a1	4,2	a1	4,6	a1	93	a1	1,2	a1
0,10-0,20	1,7	a1	2,9	a1 a2	0,0	a1	0,0	a1	4,7	a1	4,8	a1	100	a1	1,8	a1
Diluição D2**																
0,00-0,10	2,9	a1	1,6	a1	0,0	a1	0,5	a1	4,6	a1	5,0	a1	94	a1	1,3	a1
0,10-0,20	1,7	a1	3,6	a2	0,0	a1	0,3	a1	5,5	a1	5,6	a1	99	a1	2,2	a1
Diluição D3**																
0,00-0,10	2,7	a1	2,3	a1	0,0	a1	0,4	a1	5,1	a1	5,6	a1	93	a1	0,6	a1
0,10-0,20	1,9	a1	3,4	a2	0,0	a1	0,0	a1	5,5	a1	5,6	a1	100	a1	1,7	a1
Diluição D4**																
0,00-0,10	2,6	a1	2,6	a1	0,0	a1	0,6	a1	5,2	a1	5,6	a1	93	a1	0,9	a1
0,10-0,20	2,0	a1	2,9	a1 a2	0,0	a1	0,0	a1	5,0	a1	5,0	a1	100	a1	1,7	a1
Diluição D5**																
0,00-0,10	2,5	a1	2,6	a1	0,0	a1	0,4	a1	5,2	a1	5,5	a1	95	a1	0,9	a1
0,10-0,20	1,9	a1	4,5	a2	0,0	a1	0,0	a1	6,6	a1	6,6	a1	100	a1	1,7	a1
Mata Nativa**																
0,00-0,10	7,8	a2	1,7	a1	0,0	a1	2,7	a1	9,8	a2	11,1	a2	88	a1	0,7	a1
0,10-0,20	4,1	a2	0,6	a1	0,0	a1	0,0	a1	4,9	a1	5,0	a1	100	a1	1,2	a1

Ca²⁺: Cálcio; Mg²⁺: Magnésio; Al³⁺: Alumínio; (H+Al): Acidez potencial; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca catiônica; V: Saturação por bases; PST: Percentagem de sódio trocável. Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura. **Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

3.5 Retenção de água no solo

As curvas de retenção de água no solo referente à diluição D1 (Figura 6A) apresentaram tendências diferentes para as camadas estudadas. A maior retenção observada foi na tensão de 33 kPa para as duas camadas, sendo a subsuperficial (0,10-0,20m) superior, porém com valores próximos. Isso pode ser explicado em função das características intrínsecas da classe de solo que o experimento foi desenvolvido (Argissolo). Essa classe, em suas camadas subsuperficiais, possuem um teor de argila superior que contribuiu para maior retenção (Figura 7A) (Klein; Klein, 2015). Nas médias e altas tensões os valores de umidade volumétrica foram maiores na camada superficial.

As curvas para as diluições D2, D3, D4 e D5 e mata nativa apresentaram retenção superior na camada superficial (0,00-0,10m). Isso aconteceu tanto pela influência da textura do solo como pela ação das diluições aplicadas por meio da modificação dos atributos estruturais que favoreceram a maior retenção de água no solo (Wang *et al.*, 2020). Já as curvas de retenção da diluição D2 não apresentaram diferenciação nas tensões maiores que se referem as forças de adsorção. O mesmo se repetiu para as diluições D3 e D4.

Já as curvas referentes a diluição D5 se mostraram distintas entre as camadas, sendo superiores na superfície (0,00-0,10m) em todas as tensões aplicadas. O mesmo se repetiu para a mata nativa. Isso indica que as forças de adsorção são melhores em solos mais estruturados.

As propriedades hidráulicas controlam processos como infiltração, drenagem e redistribuição de soluções no solo. A estrutura do solo, que pode controlar processos físicos, químicos e biológicos no solo, é a principal modificadora dessas propriedades, podendo, também, ser alterada por esses processos (Dong *et al.*, 2022).

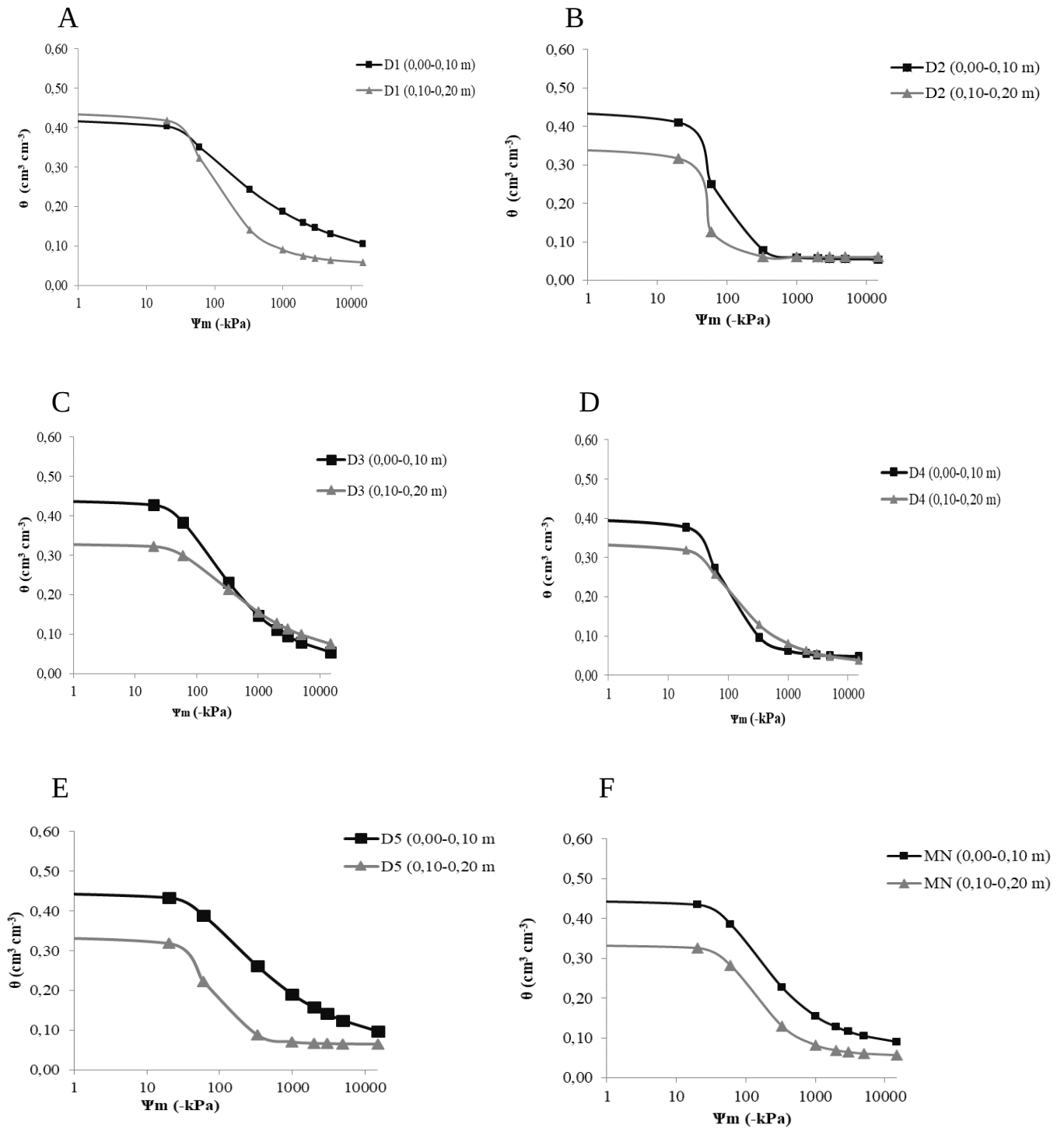


Figura 6. Curvas de retenção de água no solo dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Os valores de umidade de saturação (θ_s) foram maiores na camada superficial (0,00-0,10m) em todas as diluições e na mata nativa, sendo as diluições D2 e D5 e mata nativa superiores, porém próximos às demais. Com relação a umidade residual (θ_r), todas as diluições apresentaram maiores valores na camada subsuperficial (0,10-0,20m), diferente da mata nativa.

Tanto as diluições quanto a mata nativa apresentaram as maiores condutividades hidráulicas relativas (K_r) na camada superficial, com todas as diluições apresentando valores semelhantes e superiores a mata nativa (Tabela 7).

Isso indica que as diluições contribuíram para a melhoria do atributo já que θ_s e K_r seguiram a mesma tendência do COT e DMP. De acordo com Xue *et al.* (2022), a condutividade hidráulica dos solos é alterada quando há modificação nas variáveis estruturais como a estabilidade dos agregados e porosidade.

Tabela 7. Parâmetros das curvas de retenção de água no solo, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e água disponível dos tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Camadas (m)	θ_r	θ_s	α	N	M	CC	PMP	AD	Kr	R ²
	cm ³ /cm ³		Adimensional			cm ³ /cm ³		cm/h		
Diluição D1										
0,00-0,10	0,04	0,43	0,03	1,31	0,23	0,14	0,01	0,14	168,01	0,97
0,10-0,20	0,05	0,45	0,02	1,80	0,44	0,10	0,05	0,05	139,06	0,99
Diluição D2										
0,00-0,10	0,05	0,45	0,02	2,33	0,57	0,10	0,03	0,07	163,03	0,98
0,10-0,20	0,06	0,34	0,03	3,56	0,72	0,08	0,04	0,04	124,96	0,98
Diluição D3										
0,00-0,10	0,02	0,44	0,01	1,48	0,32	0,15	0,03	0,12	156,6	0,97
0,10-0,20	0,03	0,33	0,01	1,37	0,27	0,14	0,05	0,09	140,65	0,98
Diluição D4										
0,00-0,10	0,05	0,40	0,02	2,03	0,51	0,09	0,03	0,05	162,13	0,99
0,10-0,20	0,03	0,34	0,02	1,59	0,37	0,06	0,02	0,04	149,17	0,99
Diluição D5										
0,00-0,10	0,04	0,45	0,02	1,38	0,27	0,16	0,04	0,12	162,13	0,97
0,10-0,20	0,06	0,34	0,02	2,27	0,56	0,08	0,05	0,03	158,96	0,99
Mata Nativa										
0,00-0,10	0,07	0,45	0,01	1,60	0,38	0,20	0,07	0,14	108,42	0,99
0,10-0,20	0,05	0,33	0,01	1,93	0,48	0,15	0,04	0,10	106,25	0,99

θ_r : Umidade residual; θ_s : Umidade de saturação; α , n, m: Parâmetros adimensionais; CC: Capacidade de campo; PMP: Ponto de murcha permanente; AD: Água disponível; K_r : Condutividade hidráulica relativa estimada; R^2 : Coeficiente de regressão linear. Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

Os parâmetros α , n, m se referem a entrada de ar, inclinação das curvas e tamanho e formato dos poros, respectivamente. Esses são indicadores importantes para confirmação dos dados calculados pelo modelo de van Genuchten em relação aos quantificados. Assim, a

diluição D2 apresentou os maiores valores dos três parâmetros e a diluição D3, os menores. Os coeficientes de regressão linear (R^2) indicaram que o ajuste nas curvas de retenção de água no solo pela equação de van Genuchten foi realizado de maneira eficiente, pois apresentaram valores acima de 90%. De maneira geral, os valores de capacidade de campo (CC) e água disponível (AD), foram maiores para mata nativa e diluição D5 em superfície, diferente do ponto de murcha permanente (PMP) que teve comportamento contrário, excetuando a mata nativa. (Tabela 7).

3.6 Macroartropodes do solo

A partir dos resultados referentes a quantificação dos macroartropodes, pode-se quantificou-se presença de 8 ordens de indivíduos nos períodos seco e chuvoso (Hymenoptera, Coleoptera, Diptera, Orthoptera, Aranae, Hemiptera, Diplopoda e Homoptera), sendo que a quantidade de ordens foi maior no período chuvoso. Foram observadas variações das ordens em função da sazonalidade das chuvas e dos tratamentos (diluições) aplicados, com maior ocorrência de indivíduos para as ordens Hymenoptera e Coleoptera nos dois períodos estudados, destacando-se a Mata Nativa e a Diluição D3, respectivamente (Tabela 8).

Tabela 8. Número de indivíduos por ordem em função da sazonalidade e tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Ordens	Diluição D1		Diluição D2		Diluição D3		Diluição D4		Diluição D5		Mata Nativa	
	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
Número de indivíduos												
HYM	105	109	163	97	140	295	159	133	115	130	547	855
COL	-	8	5	19	1	11	2	17	2	5	67	197
DIP	1	13	-	9	-	16	2	36	-	13	17	2
ORT	5	5	3	6	-	4	-	2	-	4	1	25
ARA	5	1	2	1	-	1	4	-	10	1	-	25
HEM	-	-	-	-	-	1	-	6	-	5	1	3
DIPL	-	-	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
HOM	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-	-	-
Total	116	136	173	133	141	329	167	194	127	158	633	1107

HYM: Hymenoptera; COL: Coleoptera; DIP: Diptera; ORT: Orthoptera; ARA: Aranae; HEM: Hemiptera; DIPL: Diplopoda; HOM: Homoptera; Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; e Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

Através dos índices de diversidade ecológica de Shannon (H), Pielou (e) e Simpson (S) o período chuvoso apresentou uma maior diversidade de macroartropodes quando comparado

ao período seco. O índice de Shannon indica que a diluição D3 foi inferior à mata nativa nos dois períodos estudados. Já o índice de Pielou indicou que as diluições D1, D2 e D4 foram superiores a mata nativa às demais no período chuvoso, sendo que a mais baixa também foi a diluição D3. No período seco as diluições D1, D5 e mata nativa foram superiores às demais. Com relação ao índice de Simpson, o mesmo seguiu a mesma tendência do índice de Shannon, com a diluição D3 inferior às demais (Tabela 9).

Tabela 9. Índices de diversidade ecológica de Shannon (H), Pielou (e) e Simpson (S) para os tratamentos (Diluições) em palma forrageira com efluentes da aquicultura e mata nativa, Mossoró-RN.

Diluições	Shannon H'	Shannon H'	Pielou e	Pielou e	Simpson S	Simpson S
Período**						
	(Seco)	(Chuvoso)	(Seco)	(Chuvoso)	(Seco)	(Chuvoso)
Diluição D1	0,40 a6	0,73 a4	0,08 a5	0,15 a5	0,18 a5	0,34 a3
Diluição D2	0,28 a3	0,68 a3	0,05 a2	0,14 a4	0,11 a3	0,43 a5
Diluição D3	0,04 a1	0,45 a1	0,01 a1	0,08 a1	0,01 a1	0,19 a1
Diluição D4	0,24 a2	0,94 a5	0,05 a2	0,18 a6	0,09 a2	0,49 a6
Diluição D5	0,36 a4	0,62 a2	0,07 a4	0,12 a3	0,17 a4	0,31 a2
Mata nativa	0,38 a5	0,68 a3	0,06 a3	0,10 a2	0,24 a6	0,37 a4

Tratamentos: Diluição D1 (controle) – 100% de Água de abastecimento mais 0% de Efluente da Aquicultura; Diluição D2 – 75% de Água de abastecimento mais 25% de Efluente da Aquicultura; Diluição D3 – 50% de Água de abastecimento mais 50% de Efluente da Aquicultura; Diluição D4 – 25% de Água de abastecimento mais 75% de Efluente da Aquicultura; Diluição D5 – 0% de Água de abastecimento mais 100% de Efluente da Aquicultura.

**Médias seguidas de mesma letra, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4. CONCLUSÕES

Os atributos estruturais, químicos e os índices ecológicos discriminaram a mata nativa, enfatizando a importância da manutenção dos ambientes preservados.

Os atributos hídricos, estruturais e índices ecológicos discriminaram as diluições, indicando melhoria na qualidade estrutural do solo.

A diluição D2 contribuiu significativamente para a microporosidade, carbono orgânico total, magnésio e sódio do solo, a diluição D3 para o índice de floculação e a D4 para a macroporosidade e diâmetro médio ponderado.

A diluição D3 é a mais indicada para o cultivo da palma forrageira, com menor restrição quanto ao Na^+ , embora também tenha apresentado tendência a sodicidade do solo já que a PST aumentou, assim como em todas as outras diluições que evoluíram de 0,00 % para o valor máximo de 2,2 % na diluição D2 em apenas 1,5 anos de experimento.

O número de ordens e os índices ecológicos de diversidade dos macroartrópodes variam de acordo com a diluição aplicada e a sazonalidade, pois o período chuvoso foi importante na diversidade de ordens, principalmente nas diluições D1 e D4.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Almeida, M. A. X.; Souto, J.S.; Andrade, A. P. Sazonalidade da macrofauna edáfica do Curimataú da Paraíba, Brasil. **Revista Ambiente Guarapuava**, v. 11, p. 393 – 407, 2015.

AL-SHAMMARY, A. A. G. *et al.* Soil Bulk Density Estimation Methods: A Review. **Pedosphere**, v. 24, n. 4, pp. 581-596, 2018. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S1002-0160\(18\)60034-7](https://doi.org/10.1016/S1002-0160(18)60034-7). Acesso em: 10 de fev. 2024.

ALVAREZ, V. V. H. *et al.* Interpretação dos resultados das análises de solos. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ V., V. H. (Eds.). **Recomendação para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa: Comissão de Fertilidade do Solo do estado de Minas Gerais, 1999. p. 25-32.

BATO, Y.; BEKELE, T.; DEMISSEW, S. Effect of different land use systems and soil depths on soil chemical properties alteration in Yerer forests and its surrounding area, at the central highland of Ethiopia. **Research Square**, pré-impressão (versão 1), 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.21203/rs.2.22094/v1>. Acesso em: 14 de fev. 2024.

BONANOMI, G. *et al.* Repeated applications of organic amendments promote beneficial microbiota, improve soil fertility and increase crop yield. **Applied Soil Ecology**, v. 156, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103714>. Acesso em: 29 de jan. 2024.

BU, R. *et al.* Deciphering the role of particulate organic matter in soil nitrogen transformation in rice–rapeseed and rice–wheat rotation systems. **Applied Soil Ecology**, v. 193, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105146>. Acesso em: 20 de jan. 2024.

CHENG, Y. *et al.* Organic substitution improves soil structure and water and nitrogen status to promote sunflower (*Helianthus annuus* L.) growth in an arid saline area. **Agricultural Water Management**, v. 283, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108320>. Acesso em 29 de janeiro de 2024.

COTRUFO, M. F.; LAVALLEE, J. M. Chapter One - Soil organic matter formation, persistence, and functioning: A synthesis of current understanding to inform its conservation and regeneration. **Advances in Agronomy**, v. 172, p. 1-66, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2021.11.002>. Acesso em 29 de janeiro de 2024.

COELHO, D. C. L. *et al.* Alterações químicas de Argissolo irrigado com percolado de aterro sanitário e água de abastecimento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, n. 6, p.598–604, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v19n6p598-604>. Acesso em: 03 de fev. 2024.

COÊLHO, J. J. *et al.* Exotic forage grasses in the Brazilian semi-arid region: Forage mass, competitiveness, and botanical similarities of non-native pastures. **Journal of Arid Environments**, v. 193, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2021.104551>. Acesso em: 03 de fev. 2024.

COSTA, A. G. *et al.* Chemical characteristics of irrigated ultisol with dairy effluent dilutions. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, e20170551, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2179-8087.055117>. Acesso em: 08 de fev. 2024.

DANTAS, F. D. G. *et al.* Drip irrigation with saline water combined with mulch cover as strategies for forage cactus production in semi-arid zones. **Irrigation Science**, v. 41, n. 2, p. 295-308, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00841-8>. Acesso em: 8 fev. 2024.

DAWES, L.; GOONETILLEKE, A. Using multivariate analysis to predict the behaviour of soils under effluent irrigation. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 172, p. 109-127, 2006. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11270-005-9064-z>. Acesso em: 02 de fev. de 2024.

DENG, Y. *et al.* Key drivers of soil arthropod community shift across a subalpine forest series vary greatly with litter and topsoil layers. **European Journal of Soil Biology**, v. 111, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2022.103421>. Acesso em: 01 de fev. 2024.

DONG, L. *et al.* Impact of short-term organic amendments incorporation on soil structure and hydrology in semiarid agricultural lands. **International Soil and Water Conservation Research**, v. 10, n. 3, p. 457-469, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2021.10.003>. Acesso em: 09 de fev. 2024.

DUBREUIL, V. *et al.* Os tipos de climas anuais no Brasil: uma aplicação da classificação de Köppen de 1961 a 2015. **Revista Franco-Brasileira de Geografia**, n. 37, p. 1-20, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.15738>. Acesso em: 18 de fev. 2024.

FERREIRA, D. F. Sisvar: a computer statistical analysis system. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 35, n. 6, p. 1039-1042, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>. Acesso em: 02 de fev. 2024.

GENGMAO, Z.; MEHTA, S. K.; ZHAOPU, L. Use of saline aquaculture wastewater to irrigate salt-tolerant Jerusalem artichoke and sunflower in semiarid coastal zones of China. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 12, pp. 1987-1993, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.04.013>. Acesso em: 21 de jan. 2024.

HERRERA, A. M.; RIERA, R.; RODRÍGUEZ, R. A. Alpha species diversity measured by Shannon's H-index: Some misunderstandings and underexplored traits, and its key role in exploring the trophodynamic stability of dynamic multiscales. **Ecological Indicators**, v. 156, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111118>. Acesso em: 15 de fev. 2024.

IBRAHIM L. A. *et al.* A Comprehensive review of the multiple uses of water in aquaculture-integrated agriculture based on international and national experiences. **Water**, v. 15, n. 2, p. 367, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w15020367>. Acesso em 19 de fev. 2024.

JÚNIOR, G. N. A. *et al.* Use of intercropping and mulch to improve the water and natural resources use efficiencies of forage cactus and millet production in a semiarid region. **Field Crops Research**, v. 304, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2023.109171>. Acesso em: 05 de fev. 2024.

KIRCHNER, J. W. Aggregation in environmental systems – Part 1: Seasonal tracer cycles quantify young water fractions, but not mean transit times, in spatially heterogeneous catchments. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 20, ed. 1, p. 279-297, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.5194/hess-20-279-2016>. Acesso em: 12 de fev. 2024.

KLEIN, C.; KLEIN, V. A. Estratégias para potencializar a retenção e disponibilidade de água no solo. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 19, p. 21-29, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5902/2236117014990>. Acesso em: 09 de fev. 2024.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Densidade e distribuição do diâmetro dos poros de um latossolo vermelho, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 26, p. 857-867, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000400003>. Acesso em 16 de fev. 2024.

KOOL, D. *et al.* Soil water retention and hydraulic conductivity dynamics following tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 193, p. 95-100, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.05.020>. Acesso em: 20 de fev. 2024.

LAVELLE, P. *et al.* Soil invertebrates and ecosystem services. **European Journal of Soil Biology**, v. 42, n. 1, p. S3-S15, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejsobi.2006.10.002>. Acesso em: 3 de jan. 2024.

LEMOS, M. de. *et al.* The effect of domestic sewage effluent and planting density on growth and yield of prickly pear cactus in the semiarid region of Brazil. **Journal of Arid Environments**, v. 185, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2020.104372>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

LOH, C. Y. *et al.* Recovery of ammonia and phosphate from aquaculture effluent using a reactive vacuum membrane distillation-vacuum membrane distillation/nanofiltration hybrid system. **Separation and Purification Technology**, v. 327, p. 124893, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.124893>. Acesso em: 06 fev. 2024.

LOPEZ, G. V. *et al.* Diversity of soil macro-arthropods correlates to the richness of plant species in traditional agroforestry systems in the humid tropics of Mexico. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 286, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106658>. Acesso em: 12 de fev. 2024.

MARTINS, L. de F. *et al.* Caracterização física de agregados do solo submetido a 10 anos de aplicação de dejetos suínos. **Revista de Ciências Agrícolas**, v. 36, n. 1, p. 79–92, 2019. DOI: 10.22267/rcia.193601.100. Disponível em: <https://revistas.udenar.edu.co/index.php/rfacia/article/view/4700>. Acesso em: 20 fev. 2023.

OLAYEMI, O. P. *et al.* Soil macrofauna and microbial communities respond in similar ways to management drivers in an irrigated maize system of Colorado (USA). **Applied Soil Ecology**,

v. 178, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104562>. Acesso em: 11 de fev. 2024.

PAZ, A. M. *et al.* Prediction of soil salinity and sodicity using electromagnetic conductivity imaging. **Geoderma**, v. 361, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114086>. Acesso em: 18 de jan. 2024.

PEDROSA, T. D. Uso agrícola da água residuária da aquicultura e seus impactos na palma forrageira e no solo - 2021/2022. 117 f. Tese. (Doutorado em Manejo de Solo e Água) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2023.

PIRES, L. F. *et al.* 3D analysis of the soil porous architecture under long term contrasting management systems by X-ray computed tomography. **Soil and Tillage Research**, v. 191, p. 197-206, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.02.018>

SANTOS, L. A. O.; BISCHOFF, A.; FERNANDES, O. A. The effect of forest fragments on abundance, diversity and species composition of predatory ants in sugarcane Fields. **Basic and Applied Ecology**, v. 33, p. 58-65, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.baae.2018.08.009>

SINGH, P.; SHARMA, S.; NISAR, S.; CHOUDHARY, O. P. Structural Stability and Organic Matter Stabilization in Soils: Differential Impacts of Soil Salinity and Sodicity. **Journal of Soil Science and Plant Nutrition**, v. 23, p. 1751-1773, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s42729-023-01136-3>. Acesso em 29 de janeiro de 2024.

STATSOFT INC. 2020. **Statistica**: data analysis software system, version 14. Tulsa. Disponível em: <http://www.statsoft.com/>. Acesso em: 26 nov. 2024.

TANG, S. *et al.* Effect of salinity on soil structure and soil hydraulic characteristics. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 101, n. 1, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1139/cjss-2020-0018>. Acesso em: 5 de jan. 2024.

TEIXEIRA, P. C. *et al.* **Manual de métodos de análise de solo**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2017, 573 p.

VALLEJOS, M. B. *et al.* Salinity and N input drive prokaryotic diversity in soils irrigated with treated effluents from fish-processing industry. **Applied Soil Ecology**, v. 175, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2022.104443>. Acesso em: 17 de fev. 2024.

VAN GENUCHTEN, M. T.; LEIJ, F. J.; YATES, S. R. **RETIC, code for quantifying the hydraulic functions of unsaturated soils**: Version 6.02. University of California, Riverside. 2009.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed-form equation for predicting the conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of American Journal**, v. 44, p. 892-898, 1980.

WU, Z. *et al.* Soil acidification and factors controlling topsoil pH shift of cropland in central China from 2008 to 2018. **Geoderma**, v. 408, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2021.115586>. Acesso em: 16 de fev. 2024.

YANG, Y. *et al.* Acid-base buffering characteristics of non-calcareous soils: Correlation with physicochemical properties and surface complexation constants. **Geoderma**, v. 360, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114005>. Acesso em: 08 de jan. 2024.

XUE, P.; FU, Q.; LI, T.; LIU, D.; HOU, R.; LI, Q.; LI, M.; MENG, F. Effects of biochar and straw application on the soil structure and water-holding and gas transport capacities in seasonally frozen soil areas. **Journal of Environmental Management**, v. 301, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113943>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

ZHANG, S. *et al.* Biochar and Chlorella increase rice yield by improving saline-alkali soil physicochemical properties and regulating bacteria under aquaculture wastewater irrigation. **Chemosphere**, v. 340, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.139850>. Acesso em: 10 de fev. 2024.

ZHAO, Y. *et al.* Soil organic matter enhances aboveground biomass in alpine grassland under drought. **Geoderma**, v. 433, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2023.116430>. Acesso em: 18 de fev. 2024.