



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

JULIO CESAR VADO ESPINOZA

HIDRÁULICA DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA
SALOBRA: PYTHON, TEORIA FRACTAL, CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E
MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA

MOSSORÓ

2024

JULIO CESAR VADO ESPINOZA

**HIDRÁULICA DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA
SALOBRA: PYTHON, TEORIA FRACTAL, CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E
MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA**

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

Linha de Pesquisa: Tratamento e uso de resíduos e seus impactos no solo e da água

Orientador: Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr.
Coorientador: Paulo Cesar Moura da Silva, Prof. Dr.

MOSSORÓ

2024

©Todos os direitos estão reservados à Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do autor, 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 tornar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata, exceto as pesquisas que estejam vinculadas ao processo de patenteamento. Esta investigação será base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu respectivo autor seja devidamente citado e mencionado os seus créditos bibliográficos.

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Biblioteca Central Orlando Teixeira (BCOT)
Setor de Informação e Referência (SIR)

v124h VADO ESPINOZA, Julio Cesar.
Hidráulica de gotejadores operando com diluições de água salobra: python, teoria fractal, classificação de imagens e microscopia eletrônica por varredura / Julio Cesar Vado Espinoza - 2024. 92 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista.
Coorientador: Paulo Cesar Moura da Silva.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água, 2024.

1. Programação. 2. Pixels. 3. Manova. 4. Post-Hoc, . 5. Irrigação localizada. I. Batista, Rafael Oliveira, orient. II. Moura da Silva, Paulo Cesar, coorient. III. Título.

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

JULIO CESAR VADO ESPINOZA

**HIDRÁULICA DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA
SALOBRA: PYTHON, TEORIA FRACTAL, CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS E
MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA**

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

Linha de Pesquisa: Tratamento e uso de resíduos e seus impactos no solo e da água

Defendida em: 23/02/2024

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente



RAFAEL OLIVEIRA BATISTA

Data: 05/05/2024 16:14:24-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Rafael Oliveira Batista, Prof. Dr. (UFERSA)

Presidente

**PAULO CESAR
MOURA DA SILVA:**
91358540497

Assinado digitalmente por PAULO CESAR MOURA DA SILVA:
91358540497
DN: CN=PAULO CESAR MOURA DA SILVA:91358540497,
OU=UFERSA - Universidade Federal Rural Do Semi-Árido,
O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu sou o autor deste documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2024.05.07 15:25:47-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.0.0

Paulo Cesar Moura da Silva, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



STEFESON BEZERRA DE MELO

Data: 06/05/2024 17:47:06-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Stefeson Bezerra de Melo, Prof. Dr. (UFERSA)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



LAIO ARIEL LEITE DE PAIVA

Data: 05/05/2024 16:24:04-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Laio Ariel Leite de Paiva, Dr. (SEBRAE)

Membro Examinador

Documento assinado digitalmente



CRISTIANO TAGLIAFERRE

Data: 07/05/2024 09:37:32-0300

Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Cristiano Tagliaferre, Prof. Dr. (UESB)

Membro Examinador

*A minha avó Delfina (In Memoriam), sempre
presente nos meus pensamentos!*

*Dedico a Cesarito e Alexander,
meus eternos companheiros de viagem!*

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Organização dos Estados Americanos (OEA) e à Universidade Federal Rural do Semi-Arido (UFERSA), pela oportunidade.

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água (PPGMSA) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte e apoio financeiro.

Agradeço ao professor Rafael Batista pela paciência e orientação nesta jornada.

Agradeço a Bruno Fernandes pela grande ajuda com as imagens por microscopia eletrônica de varredura.

Agradeço à minha família pelo suporte e amor incondicional.

Aos estudantes da UFERSA que me deram suporte na coleta de dados.

“Humans nowadays completely dominate the planet not because the individual human is far smarter and more nimble-fingered than the individual chimp or wolf, but because Homo sapiens is the only species on earth capable of cooperating flexibly in large numbers. Intelligence and toolmaking were obviously very important as well. But if humans had not learned to cooperate flexibly in large numbers, our crafty brains and deft hands would still be splitting flint stones rather than uranium atoms.”

Yuval Noah Harari

RESUMO GERAL

A utilização de água salina e de sistemas que otimizem este recurso, como o caso da irrigação por gotejamento, representa alternativa atraente para a convivência com a escassez hídrica. No entanto, a qualidade inferior das águas afeta a eficiência dos sistemas de irrigação por gotejamento, pois há tendência de entupimento dos emissores pela acumulação de agentes de obstrução, que podem ser de origem química, biológica ou física. Diante disso, é preciso estudar e analisar as causas e os efeitos do processo de entupimento, exigindo aplicação de teorias e ferramentas matemáticas, estatísticas e computacionais que facilitem a abordagem e a compreensão dessa dinâmica complexa, envolvendo variáveis distribuídas nas dimensões temporais e espaciais do processo de irrigação. Neste contexto, objetivou-se com o presente trabalho aplicar e avaliar técnicas estatísticas e matemáticas para analisar a vazão média e os indicadores de obstrução coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e redução de vazão relativa (RVR) em unidades gotejadoras operando com diluições de água salobra. Para isso, foi feita uma simulação de um sistema de irrigação com gotejadores não autocompensantes, o qual foi configurado no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subsubdivididas com três repetições, tendo nas parcelas as três diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB) (D1 - 100% de AB; D2 – 50% de AB mais 50% de AS; e D3 - 100% de AS); nas subparcelas, os três tipos de gotejadores não autocompensantes (NJ, SL e ST); e nas subsubparcelas, os tempos de avaliação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h). No início, meio e fim do período experimental, foram quantificados os parâmetros químicos nas diluições: pH, CE, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , sólidos suspensos totais (SST) e sólidos dissolvidos totais (SDT). Os dados obtidos foram submetidos a Análises de Componentes Principais (ACP), à Análise Multivariada de Variância (MANOVA), ao teste *post-hoc* e a classificação supervisionada, utilizando a linguagem de uso livre Python 3.0, classificação de imagens geradas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) utilizando ArGIS e teoria fractal. Os resultados indicaram que a diluição e o tipo de emissor explicam a dinâmica do processo de entupimento, em que houve elevação do nível de obstrução com aumento da salinidade na água de irrigação. Os menores níveis de obstruções ocorreram no tratamento controle (100% de AB) com o emissor ST, onde os resultados apontam que se produziu menor quantidade de partículas com as maiores áreas médias, assim como a mais baixa porcentagem de ocupação de espaços vazios. A combinação SL-D3 proporcionou maior potencial de obstrução, com redução do CUD inicial de 93% para 68%; entretanto as combinações menos afetadas pelo entupimento foram SL-D1 e NJ-D2, ambas finalizando os ensaios com CUD de 90%. Com relação ao indicador RVR, as combinações que apresentaram maiores níveis de obstrução (40%) foram ST-D2, SL-D2 e SL-D3 ao fim dos ensaios, e a combinação menos afetada por entupimento com RVR de 25% no fim foi SL-D1. O teste *post-hoc* aplicado aos dados indica variação estatisticamente significativa dos coeficientes CUD e RVR ao longo dos tempos 0 a 160 h e 80 a 160 h, não existindo variação estatisticamente significativa das 0 às 80 h; no caso do pH, os resultados mostram que oscilou ao longo do tempo. Finalmente, a condutividade elétrica não foi influenciada pelo tempo das avaliações, porém houve relação significativa com as diluições.

Palavras-chave: Programação, Pixels, Manova, *Post-hoc*, Irrigação localizada. Obstrução.

GENERAL ABSTRACT

The use of saline water and systems that optimize this resource, such as drip irrigation, represent an attractive alternative for living with water scarcity. However, poor water quality affects the efficiency of drip irrigation systems, as they tend to clog the emitters through the accumulation of clogging agents, which can be of chemical, biological or physical origin. Therefore, it is necessary to study and analyze the causes and effects of the clogging process, requiring the application of mathematical, statistical and computational theories and tools that facilitate the approach and understanding of this complex dynamics, involving variables distributed in the temporal and spatial dimensions of the process of irrigation. In this context, the objective of this work was to apply and evaluate statistical and mathematical techniques to analyze the average flow rate and the indicators of obstruction distribution uniformity coefficient (DUC) and relative flow rate reduction (RFR) in dripping units operating with dilutions of brackish water. For this, a simulation of an irrigation system with non-self-compensating drippers was carried out, which was configured in a completely randomized design in a sub-subdivided plot scheme with three replications, having in the plots the three dilutions of brackish water (BW) in supply water (SW) (D1 - 100% of SW; D2 - 50% of SW plus 50% of BW; and D3 - 100% of BW); in the subplots, the three types of non-self-compensating drippers (NJ, SL and ST); and in the sub-subplots, the evaluation times (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 and 160 h). At the beginning, middle and end of the experimental period, chemical parameters were quantified in the dilutions: pH, EC, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , CO_3^{2-} , HCO_3^- , total suspended solids (TSS) and total dissolved solids (TSD). The data obtained were subjected to Principal Component Analysis (PCA), Multivariate Analysis of Variance (MANOVA), *post-hoc* test and supervised classification, using the free language Python 3.0, classification of images generated by electron microscopy of scanning (EMS) using ArGIS and fractal theory. The results indicated that the dilution and type of emitter explain the dynamics of the clogging process, in which there was increasing level of obstruction with an increase of salinity in the irrigation water. The lowest levels of obstructions occurred in the control treatment (100% SW) with the ST emitter, where the results indicate that fewer particles were produced with the largest average areas, as well as the lowest percentage of empty space occupation. The SL/D3 combination provided greater potential for obstruction, with a reduction in initial DUC from 93% to 68%; however, the combinations least affected by clogging were SL-D1 and NJ-D2, both ending the tests with a DUC of 90%. Regarding the RFR indicator, the combinations that showed the highest levels of obstruction (40%) were ST-D2, SL-D2 and SL-D3 at the end of the tests and the combination least affected by clogging with an RFR of 25% at the end was SL-D1. The *post-hoc* test applied to the data indicates that there was a statistically significant variation in the DUC and RFR coefficients over the times 0 to 160 h and 80 to 160 h, with no statistically significant variation from 0 to 80 h; In the case of pH, the results show that it fluctuated over time. Finally, electrical conductivity was not influenced by the time of evaluations, but there was a significant relationship with the dilutions.

Keywords: Programming, Pixels, Manova, *Post-hoc*, Localized irrigation. Obstruction.

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1 - APLICAÇÃO DE PYTHON E CLASSIFICAÇÃO MAXVER NA ANÁLISE DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA SALOBRA

Figura 1	Localização da área experimental de reúso da água situada próximo ao Laboratório de Construções Rurais e Ambientância (LCRA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) em Mossoró-RN. Valores médios mensal e diários de precipitação pluvial e temperatura média do ar no período de janeiro de 1980 a janeiro de 2023.....	22
Figura 2	Valores diários da temperatura média do ar e a precipitação pluvial nos meses de outubro e novembro de 2022.....	23
Figura 3	Captação da água poço do Setor de Aquicultura da UFERSA.....	24
Figura 4	Esquema das três bancadas experimentais (A) destacando: (1) Reservatório plástico de 0,31 m ³ , (2) Registro de esfera de 32 mm, (3) Motobomba de 0,5 cv; (4) e (8) Manômetros de glicerina (0 a 400 kPa); (6) Filtro de discos de 130 µm, (5) e (7) Pontos para coleta de amostras de água, linhas de irrigação com emissores ST, SL e NJ; e imagem frontal de uma das bancadas (B).....	26
Figura 5	Modelo da estrutura metodológica para análises do material sedimentado nos gotejadores e sua relação com a vazão média.....	28
Figura 6	Imagens do: Gotejador com 160 h de operação (A); Equipamento QUORUM (B); Imagem raster com resolução 20X (C); e Imagem raster com resolução 1000X (D).....	33
Figura 7	Exemplo da classificação supervisionada e a criação das classes.....	34
Figura 8	Comportamento das vazões dos emissores em função do tempo.....	44
Figura 9	Distribuição espaciais das classes 1 e 2 nos três tipos de gotejadores submetidos às diluições de água salobra.....	47
Figura 10	Comportamento da vazão média dos três emissores em função métricas fractais quantidades de manchas (classe 2), áreas médias (classes 1 e 2) e PLAND classe 1.....	52

Figura 11	Comportamento da vazão média dos tipos de emissores nas diluições de água salobra em água de abastecimento.....	53
Figura 12	Imagens por microscopia eletrônica de varredura do emissor ST, abastecido com a diluição D1 com menor nível de obstrução (A), e do emissor SL, abastecido com a diluição D3 tendo o maior nível de entupimento (B).....	54

ARTIGO 2 - IMPACTO DO USO DE ÁGUA SALOBRA EM UNIDADES GOTEJADORAS: COMPORTAMENTO DO ENTUPIMENTO DOS EMISSORES

Figura 1	Localização da área experimental do LCRA/UFERSA em Mossoró-RN.....	63
Figura 2	Valores diários da temperatura média do ar e a precipitação pluvial no período experimental.....	64
Figura 3	Captação da água do poço do Setor de Aquicultura da UFERSA campus Mossoró.....	65
Figura 4	Esquema e imagem das três bancadas experimentais (A) destacando: (1) Reservatório plástico de 0,31 m ³ , (2) Registro de esfera de 32 mm, (3) Motobomba de 0,5 cv, (4) e (8) Manômetros de glicerina (0 a 400 kPa), (6) Filtro de discos de 130 µm, (5) e (7) Pontos para coleta de amostras de água, linhas de irrigação com emissores StreamLine, Super Typhoon e NaanDanJain; e imagem lateral da extremidade final de uma das bancadas (B).....	66
Figura 5	Comportamento dos coeficientes de detecção de entupimento RVR e CUD para os emissores Netafim Super Typhoon-ST (A), Netafim Streamline-SL (B) e NaanDanJain TalDrip-NJ (C) operando nas diluições de água salobra e em água de abastecimento durante 160 h.....	74

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1 - APLICAÇÃO DE PYTHON E CLASSIFICAÇÃO MAXVER NA ANÁLISE DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA SALOBRA

Tabela 1	Caraterísticas e dimensionamento dos emissores utilizados no experimento.....	27
Tabela 2	Classificação do coeficiente de correlação (r).....	35
Tabela 3	Características físico-químicas das diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB).....	37
Tabela 4	Métricas das classes vazio e entupido detectadas nos emissores que aplicaram diluições de água salobra.....	42
Tabela 5	Dados usados para gerar a Análise de Componentes Principais (ACP).....	45
Tabela 6	Matriz de correlação de Pearson das variáveis vazão e coeficientes fractais dos gotejadores aplicando diluições de água salobra.....	46
Tabela 7	Resumo dos testes Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Barlett.....	47
Tabela 8	Autovalores e percentual de variância explicada de cada componente.....	47
Tabela 9	Matriz de correlação entre as variáveis diluições, emissores, métricas fractais e vazões dos gotejadores e as componentes principais de cada variável.....	48

ARTIGO 2 - IMPACTO DO USO DE ÁGUA SALOBRA EM UNIDADES GOTEJADORAS: COMPORTAMENTO DO ENTUPIMENTO DOS EMISSORES

Tabela 1	Caraterísticas e imagens dos emissores utilizados nos ensaios experimentais..	67
Tabela 2	Características físico-químicas das diluições de salobra (AS) em água de abastecimento (AB) utilizadas nas unidades gotejadoras.....	70
Tabela 3	Dados de entrada para MANOVA.....	76
Tabela 4	Matriz de correlação de Pearson das variáveis tempo, emissores, diluições, vazão, CUD, RVR, pH e CE.....	77
Tabela 5	Análise multivariada de variância (MANOVA) destacando os resultados dos testes Lambda de Wilk, Traço de Pillai, Traço Hotelling-Lawley e Raiz máxima de Roy.....	78
Tabela 6	Teste <i>post-hoc</i>	79

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AB	Água de Abastecimento
ACP	Análise de Componentes Principais
A_{med}	Área média
AS	Água Salobra
CAERN	Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte
CE	Condutividade Elétrica
CIRCLE	Métrica fractal de círculo
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CUD	Coefficiente de Uniformidade de Distribuição
DECAM	Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais
D1	Diluição 1 (100% de AB)
D2	Diluição 2 (50% de AS)
D3	Diluição 3 (100% de AS)
FAO	Organização para a Alimentação e Agricultura
MANOVA	Análise Multivariada de Variância
Matplotlib	Livraria estatística de Python
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
Numpy	Livraria estatística de Python
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
KMO	Medida de adequação da amostragem de Kaiser-Meyer-Olkin
LCRA	Laboratório de Construções Rurais e Ambiência
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Pandas	Livraria estatística de Python
PLAND	Métrica de porcentagem de porcentagem de ocupação
Q_{med}	Vazão média
RAS	Razão de adsorção de sódio
RVR	Redução de Vazão Relativa
SHAPE	Métrica fractal de forma
SDT	Sólidos dissolvidos totais
SST	Sólidos Suspensos Totais
Sklearn	Livraria estatística de Python

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL.....	14
REFERÊNCIAS.....	16
ARTIGO 1 - APLICAÇÃO DE PYTHON E CLASSIFICAÇÃO MAXVER NA ANÁLISE DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA SALOBRA.....	17
RESUMO.....	17
ABSTRACT.....	18
INTRODUÇÃO.....	19
MATERIAL E MÉTODOS.....	22
Descrição da área experimental e classificação do clima.....	22
Tipos e qualidade das águas utilizadas nos ensaios experimentais.....	23
Delineamento experimental e montagem das bancadas experimentais.....	25
Vazão média, classificação de imagens, métricas fractais e análises estatísticas aplicadas.....	27
Análises da vazão média dos emissores.....	29
Geração de imagens aplicando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	29
Classificação utilizada no tratamento dos pixels das imagens.....	30
Métricas fractais	32
Análise multivariada.....	34
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
Qualidade das diluições de água salobra em água de abastecimento.....	37
Caracterização do comportamento da vazão nos gotejadores (vazões médias).....	39
Características das métricas nas análises e configuração espacial das classes 1 e 2.....	42
Análise multivariada aplicada à relação da vazão e coeficientes fractais dos gotejadores aplicando diluições de água salobra.....	44
CONCLUSÕES.....	52
REFERÊNCIAS.....	53

ARTIGO 2 – IMPACTO DO USO DE ÁGUA SALOBRA EM UNIDADES GOTEJADORAS: COMPORTAMENTO DO ENTUPIMENTO DOS EMISSORES.....	59
RESUMO.....	59
ABSTRACT.....	60
INTRODUÇÃO.....	61
MATERIAL E MÉTODOS.....	63
Descrição da área experimental e classificação do clima.....	63
Tipos e qualidade das águas utilizadas nos ensaios experimentais.....	64
Delineamento experimental e montagem das bancadas experimentais.....	65
Avaliação do desempenho dos emissores.....	67
Análise estatística.....	68
RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	70
Qualidade físico-química das diluições de água salobra em água de abastecimento.....	70
Ocorrência de entupimento químico em gotejadores aplicando diluições de água salobra.....	72
Análise multivariada da variância (MANOVA) e o teste <i>post-hoc</i>	76
CONCLUSÕES.....	81
REFERÊNCIAS.....	82
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	86
APÊNDICE.....	87

INTRODUÇÃO GERAL

A escassez hídrica é agravada por diversos fatores, dentre os quais se destacam as alterações climáticas, a poluição antrópica e o crescimento populacional, desafiando a segurança alimentar, principalmente das regiões áridas e semiáridas, que ocupam cerca de 41,3% da superfície terrestre, contribuindo para 44% dos sistemas cultivados, além de abrigarem cerca de 2 bilhões de pessoas (Jena *et al.*, 2023). Por isso, é imprescindível adaptar os padrões de irrigação à escassez de água das regiões áridas e semiáridas para sustentar a segurança alimentar e melhorar os rendimentos agrícolas.

A agricultura é a atividade econômica que mais consome água no mundo, de modo que ao focar nos recursos hídricos utilizados na agricultura a economia circular pode ajudar a reduzir os problemas de escassez hídrica, reduzindo o consumo e aumentando o aproveitamento de águas de qualidade de inferior, destacando-se a água salobra (Dziedzic *et al.*, 2022).

A ocorrência de fontes de água salobra é comum no semiárido brasileiro, predominantemente com condutividade elétrica entre 1,5 e 6,0 dS m⁻¹ (Cavalcante *et al.*, 2021). Assim, o uso de água salobra na agricultura deve ser criterioso, devido ao risco de salinização do solo, entretanto a diluição ou uso alternado de água doce com água salobra na irrigação por gotejamento pode mitigar o estresse salino (Zhang *et al.*, 2022).

Nesse contexto, se destaca a irrigação localizada que possibilita a aplicação da água e nutrientes de forma precisa, minimizando os desperdícios e a contaminação de águas subterrâneas e superficiais, promovendo, assim, o desenvolvimento da agrícola nas regiões áridas e semiáridas, bem como o seu alinhamento aos princípios da economia circular e Objetivos do Desenvolvimento Sustentável da Agenda 2030.

Nos sistemas de irrigação por gotejamento, o emissor é um componente de extrema importância, sendo o responsável pela dissipação da energia de pressão e fornecimento lento de pequenas quantidades de água às plantas por meio do solo. Os emissores não autocompensantes são aqueles que apresentam variações nos valores de vazão juntamente com as alterações da pressão de serviço; neste tipo de emissor, o índice de regime de vazão (x) apresenta valor superior a 0,20.

Ressalta-se que a suscetibilidade ao entupimento depende das características construtivas dos emissores e da qualidade da água utilizada na irrigação, podendo os agentes físicos, químicos e biológicos ocasionadores de obstrução atuar de forma isolada ou em

conjunto, resultando na formação de estruturas complexas denominadas biofilme, incrustação ou bioincrustação.

Esta formação de estrutura complexa, no interior dos emissores, compromete sua operação, pois a aplicação de água e nutrientes em uma área irrigada passa a ser desuniforme, comprometendo a produção vegetal nas regiões do terreno onde aparecem os emissores obstruídos.

O uso de água de qualidade inferior na irrigação localizada, tal como a água salobra, geralmente contendo excesso de íons e maiores níveis de salinidade do que água doce, pode acarretar redução da uniformidade de aplicação de água e nutrientes e consequente declínio da eficiência do sistema de irrigação, em virtude do entupimento parcial ou total dos emissores pela formação de incrustação química.

A detecção do entupimento de emissores nos sistemas de irrigação por gotejamento é realizada por meio de indicadores de desempenho hidráulico que utilizam a vazão dos gotejadores como parâmetro, destacando-se o coeficiente de uniformidade de distribuição e a redução da vazão relativa.

Estudos que utilizam de forma conjunta a programação Phyton, a geometria fractal, a classificação de imagens e a microscopia eletrônica de varredura para estudar agentes ocasionadores de obstrução em emissores não autocompensantes que aplicaram diluições de água salobra são escassos no Brasil e no mundo.

Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo geral analisar o comportamento hidráulico de gotejadores operando com diluições de água salobra empregando-se algoritmos Python, teoria fractal, classificação de imagens e microscopia eletrônica por varredura. Tendo como objetivos específicos: 1) Compreender a dinâmica do comportamento do entupimento de três tipos de gotejadores não autocompensantes operando com diluições de água salobra, empregando-se o estudo da alteração da vazão e das técnicas de programação Phyton, geometria fractal e microscopia eletrônica de varredura; e 2) Avaliar o comportamento do entupimento de três tipos de emissores não autocompensantes aplicando diluições de água salobra, utilizando-se o coeficiente de uniformidade de distribuição e a redução da vazão relativa.

REFERÊNCIAS

- CAVALCANTE, E. S. *et al.* Supplemental irrigation using brackish water on maize in tropical semi-arid regions of Brazil: yield and economic analysis. **Scientia Agrícola**, v. 78, Suppl., e20200151, 2021.
- DZIEDZIC, M. *et al.* International circular economy strategies and their impacts on agricultural water use. **Cleaner Engineering and Technology**, v. 8, p. 100504, 2022.
- JENA, L. *et al.* Unlocking potential of dryland horticulture in climate-resilient farming. In: Naorem, A.; Machiwal, D. (org.). **Enhancing resilience of dryland agriculture under changing climate: interdisciplinary and convergence approaches**. Singapore: Springer Nature Singapore, 2023. p. 343-382.
- ZHANG, Yuehong *et al.* Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: The experimental and simulation approaches. **Soil and Tillage Research**, v. 219, p. 105355, 2022.

ARTIGO 1 - APLICAÇÃO DE PYTHON E CLASSIFICAÇÃO MAXVER NA ANÁLISE DE ENTUPIMENTO DE GOTEJADORES OPERANDO COM DILUIÇÕES DE ÁGUA SALOBRA

RESUMO

As águas salobras são importantes fontes hídricas para a agricultura irrigada das regiões semiáridas. No entanto, os emissores dos sistemas de irrigação por gotejamento em função do entupimento apresentam perda de desempenho hidráulico ao longo do tempo quando abastecidos com águas salobras ou com baixa qualidade. Objetivou-se com o presente trabalho analisar o comportamento e a evolução do entupimento de três tipos de gotejadores não autocompensantes operando com diluições de água salobra, empregando-se o estudo da alteração da vazão e das técnicas de programação Phyton, geometria fractal e microscopia eletrônica de varredura. Para isso, foram montadas três bancadas de ensaio em área experimental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil. O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subsubdivididas, com três repetições. Tendo nas parcelas, as três diluições de água salobra em água de abastecimento (100% de água de abastecimento, 50% de água salobra e 100% de água salobra); nas subparcelas os três tipos de gotejadores não autocompensantes (NJ, ST e SL); e nas subsubparcelas, os tempos de avaliação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h). A pressão de serviço e o tempo de operação total utilizados nos ensaios experimentais foi de 80 kPa e 160 h, respectivamente, esses valores foram escolhidos com base no cultivo do melão na região. Utilizando Microscopia Eletrônica de Varredura, teoria de fractais e Análises de Componentes Principais obtiveram-se métricas que descreveram estatisticamente a geometria dos espaços entupidos por material sedimentado, assim como os espaços vazios formados. Os resultados indicaram que a diluição e o tipo de emissor explicam a dinâmica do entupimento. Os menores níveis de obstrução ocorreram no controle (100% de água de abastecimento) em conjunto com o emissor ST, onde as imagens revelaram nos emissores áreas médias maiores da classe 2 e porcentagem de ocupação de classe 1 menores. Já os maiores níveis de entupimento surgiram na combinação emissor SL e na diluição com 100% de água salobra.

Palavras chaves: Comportamento hidráulico, Emissores, Entupimento, Imagens, Níveis de salinidade.

ARTICLE 1 - APPLICATION OF PYTHON AND MAXVER CLASSIFICATION IN CLOGGING ANALYSIS OF DRIPPERS OPERATING WITH BRACKY WATER DILUTIONS

ABSTRACT

Brackish waters are important water sources for irrigated agriculture in semi-arid regions. However, the emitters of drip irrigation systems due to clogging show a loss of hydraulic performance over time when supplied with brackish or low quality water. The objective of this work was to analyze the behavior and evolution of clogging of three types of non-self-compensating drippers operating with brackish water dilutions, using the study of flow rate changes and Python programming techniques, fractal geometry and scanning electron microscopy. To this end, three test benches were set up in an experimental area at the Universidade Federal Rural do Semi-Árido in Mossoró-RN, Brazil. The experiment was set up in a completely randomized design in a split-plot scheme, with three replications. Having in the plots, the three dilutions of brackish water in supply water (100% supply water, 50% brackish water and 100% brackish water); in the subplots the three types of non-self-compensating drippers (NJ, SL and ST); and in the sub-subplots, the evaluation times (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 and 160 h). The working pressure and total operating time used in the experimental tests were 80 kPa and 160 h, respectively. These values were chosen based on melon cultivation in the region. Using scanning electron microscopy, fractal theory and Principal Component Analysis, metrics were obtained that statistically described the geometry of the spaces clogged by sedimented material, as well as the empty spaces formed. The results indicated that dilution and the type of emitter explain the clogging dynamics. The lowest levels of obstruction occurred in the control (100% water supply) together with the ST emitter, where the images revealed higher average class 2 areas and lower class 1 occupancy percentages in the emitters. The highest levels of clogging appeared in the SL emitter combination and in the dilution with 100% brackish water.

Keywords: Hydraulic behavior, Emitters, Clogging, Images, Salinity levels.

INTRODUÇÃO

A demanda por água está crescendo duas vezes mais rapidamente do que a população humana, conduzida pela agricultura, abastecimento urbano e indústria, que competem pela escassa água doce, principalmente nas regiões áridas e semiáridas (Abou-Shady; El-Araby, 2021; Echevarría *et al.*, 2022; Leonel; Tonetti, 2021).

A agricultura é a maior consumidora de água do planeta, estima-se que 70% do seu uso global sirvam a esta atividade. Assim, o aproveitamento de água salobra se destaca como alternativa viável para suprir a demanda hídrica do setor agrícola (Siyal; Gerbens-Leenes; Vaca-Jiménez, 2023; Yin *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023). No Brasil, a resolução Conama nº 357/2005 definiu a água salobra como aquela com a salinidade superior a 0,5 ‰ e inferior a 30‰ (BRASIL, 2005).

Ressalta-se que o uso agrícola de águas salobras está relacionado ao conceito de economia circular, cujos princípios têm foco no planejamento regenerativo, eliminando o desperdício e o uso contínuo de recursos, aspectos importantes a área de recursos hídricos. Assim, a reciclagem e a reutilização de água são fundamentais para uma abordagem sobre a economia circular e oferecem uma estratégia para melhorar o abastecimento de água (Nguyen *et al.*, 2022; Voulvoulis *et al.*, 2018).

A irrigação por gotejamento é um sistema de aplicação de água às culturas que consiste de tubos de plástico de paredes finas colocados sobre ou no solo ao longo das fileiras de plantas. Este sistema se destaca, em relação à irrigação por inundação e aspersão, por aplicar volumes menores de água com mais frequência e alta eficiência (90 a 95%), possibilitando, assim, enfrentamento à crescente escassez hídrica (Bansal *et al.*, 2021).

Neste sistema, os gotejadores são dispositivos importantes, mas as pequenas dimensões no espaçamento de seus canais e labirintos os tornam susceptíveis à atuação dos agentes ocasionadores de obstrução que prejudicam a vazão, uniformidade de aplicação de água, eficiência e vida útil do sistema (Fu *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2008).

O entupimento de gotejadores é a principal barreira que restringe a aplicação e a promoção da irrigação por gotejamento, sendo ocasionados por dois fatores que participam desse processo: 1) A qualidade da água de irrigação dotada de agentes físicos, químicos e biológicos que atuam de forma isolada e combinada; e 2) A arquitetura interna dos gotejadores (Amaral *et al.*, 2022; Feng *et al.*, 2019; Pinto *et al.*, 2017; Zhou *et al.*, 2017).

O entupimento físico de gotejadores é causado pela concentração de sólidos suspensos totais e tamanho das partículas orgânicas e inorgânicas (material orgânico suspenso,

fitoplâncton, zooplâncton, areia, silte, argila, resíduo plástico e outras) presentes na água de irrigação, de modo que, apesar da presença do sistema de filtração na irrigação por gotejamento, partículas menores que 110 μm de diâmetro ainda podem ser encontradas nos gotejadores (Li *et al.*, 2019a; Niu; Liu; Oliveira *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2022).

Estas partículas podem ser categorizadas de acordo com seu diâmetro em areias finas (diâmetro entre 200 μm e 50 μm), siltes (50 e 2 μm) e argilas ($< 2 \mu\text{m}$). Destaca-se que concentrações de sólidos suspensos totais superiores a 1250 mg L^{-1} e tamanho de partículas entre 31 e 38 μm potencializam a obstrução física de gotejadores, mesmo em sistemas com filtração (Bounoua *et al.*, 2016; Chen, 2013; Li *et al.*, 2019a; Niu; Liu; Oliveira *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2022).

O entupimento biológico de gotejadores está associado ao desenvolvimento de biofilme pela ação de bactérias, no interior dos emissores e das tubulações em virtude do nível populacional de bactérias (> 10.000 unidades formadoras de colônias por mililitro), biofilmes e teores de matéria orgânica e elementos químicos (N, P, S, C, Fe e Mn) na água de irrigação (Ait-Mouheb *et al.*, 2019; Bucks; Nakayama; Gilbert, 1979).

Após a fixação das bactérias nas paredes internas do gotejador, substâncias poliméricas extracelulares são secretadas e ajudam a formar a matriz do biofilme; assim, o entupimento biológico também pode surgir pela atividade de algas e fungos (Flemming; Neu; Wozniak, 2007; Petit *et al.*, 2022).

O entupimento químico de gotejadores é obtido pela formação de precipitados químicos na água de irrigação dentro do sistema localizado e, portanto, depende principalmente dos valores de pH, condutividade elétrica, temperatura da água e dos teores de sólidos dissolvidos totais, Fe, Mn, Ca^{2+} , Mg^{2+} e H_2S (Muniz *et al.*, 2022; Zhangzhong *et al.*, 2019).

A formação de incrustação por carbonato de cálcio compreende a nucleação seguida pelo crescimento do cristal; logo, o precipitado pode se formar na solução ou diretamente nas paredes dos emissores, assim, os cristais que crescem na solução podem posteriormente se depositar nas paredes (Capra; Scicolone, 1998; Cunha *et al.*, 2020; Muniz *et al.*, 2022; Nakayama; Bucks, 1991; Zhangzhong *et al.*, 2019).

O estudo da relação entre os agentes físicos, químicos e biológicos de entupimento é complexo, mas as diferentes reações e interações entre estes agentes influenciam diretamente na irregularidade da deposição de materiais que obstruem o interior dos gotejadores.

Não é possível descrever a superfície topográfica desses materiais que causam obstrução com o conceito da geometria Euclidiana, mas uma maneira de retratar as distintas formas dos agregados que são formados nos gotejadores é usando a geometria fractal a qual auxilia no

entendimento de comportamento geométrico de figuras mais complexas (Li *et al.*, 2012; Li *et al.*, 2019).

A dimensão fractal é um índice utilizado para descrever a irregularidade de corpos complexos e reflete a validade de um espaço ocupado por um corpo irregular, além de descrever fenômenos complicados e não lineares produzidos na natureza (Mandelbrot *et al.*, 1984; Zhang *et al.*, 2020).

Na avaliação e caracterização dos agentes físicos, químicos e biológicos de entupimento de gotejadores se destacam as imagens da microscopia eletrônica de varredura, que permite analisar tamanhos e formas de partículas orgânicas e inorgânicas, precipitados químicos e microrganismos (Katz *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2023; Ribeiro *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2022).

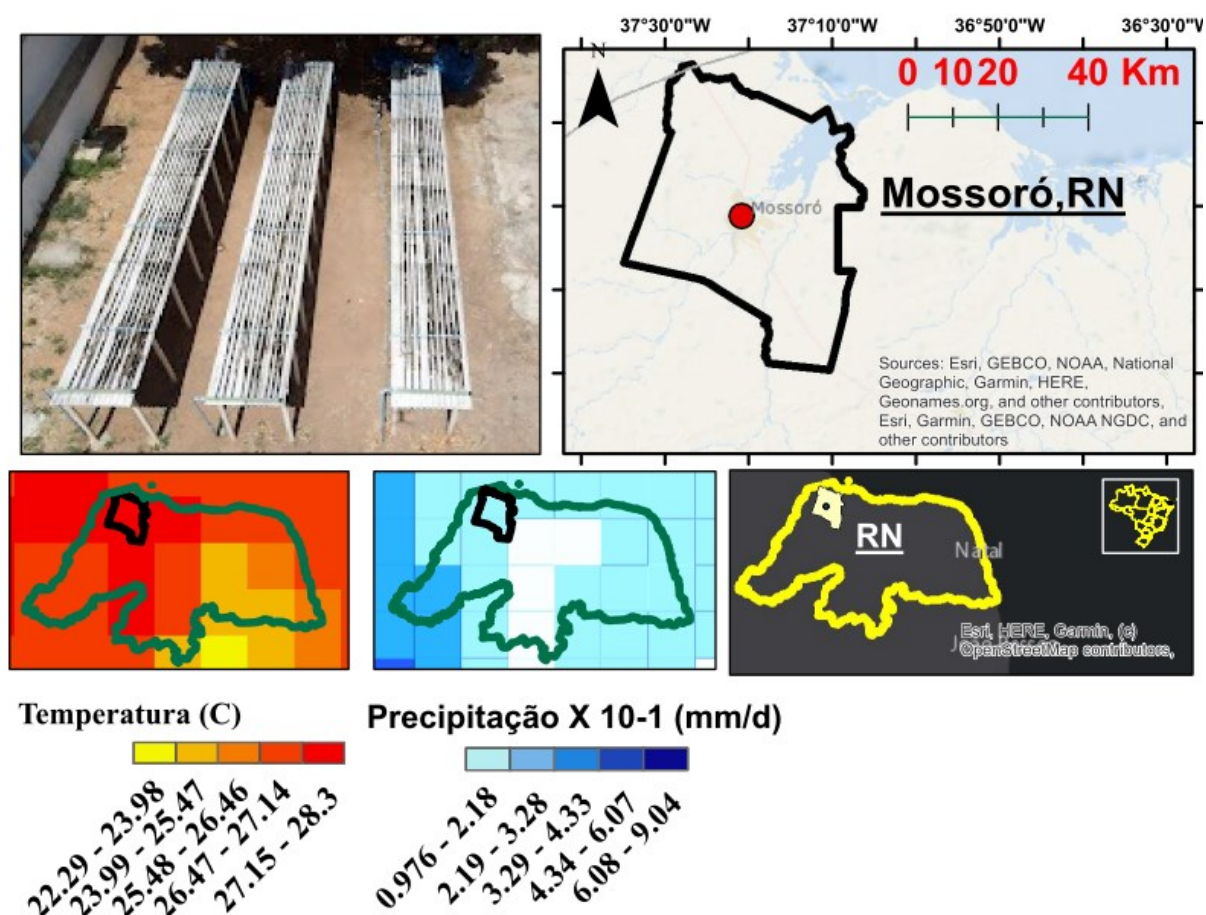
Considerando que o entupimento de um gotejador aumenta gradativamente com água de irrigação de baixa qualidade, a técnica da diluição se torna uma alternativa para a minimização dos riscos de obstrução por agentes físicos e químicos (Vale *et al.*, 2018; Vale *et al.*, 2020; Vale *et al.*, 2021).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho aplicar e avaliar técnicas estatísticas e matemáticas para analisar a vazão média de três tipos de gotejadores não autocompensantes operando com diluições de água salobra.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área experimental e classificação do clima

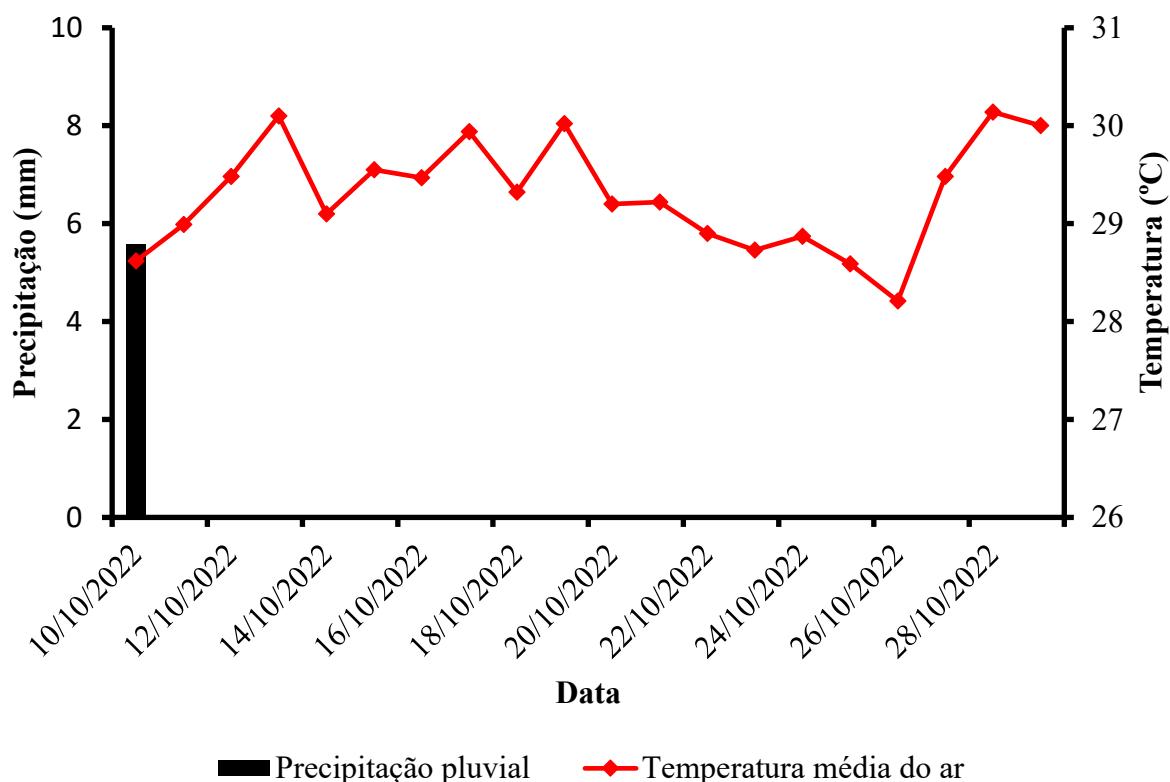
Este experimento foi iniciado no dia 10 de outubro e finalizado no dia 29 do mesmo mês do ano 2022, na Área Experimental de Reúso da Água do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LCRA) do Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais (DECAM) do Centro de Engenharias (CE), no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, Brasil ($5^{\circ}12'13,33''\text{S}$ e $37^{\circ}19'26,78''\text{O}$), conforme Figura 1.



Fonte: Autoria Própria (2024), base vetorial NASA (MERRA-2 Model/0,5 x 0,625 deg).

Figura 1. Localização da área experimental de reúso da água situada próximo ao Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LCRA) da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA) em Mossoró-RN. Valores médios mensais e diários de precipitação pluvial e temperatura média do ar no período de janeiro de 1980 a janeiro de 2023.

Pela classificação de Koppen-Geiger, a região do estudo apresenta clima tipo BSh, semiárido e quente, onde h indica baixa latitude e altitude tendo precipitação pluvial média de 794 mm e temperatura média do ar de 26,5°C (Alvares *et al.*, 2013; Dubreuil *et al.*, 2018). Na Figura 2 estão apresentados os valores diários da temperatura média do ar e a precipitação pluvial durante o período experimental.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 2. Valores diários da temperatura média do ar e a precipitação pluvial nos meses de outubro e novembro de 2022.

Tipos e qualidade das águas utilizadas nos ensaios experimentais

No experimento, foram utilizados dois tipos de água, água de abastecimento (AB) com menor salinidade e água salobra (AS) tendo maior salinidade. A água de abastecimento foi proveniente da rede pública gerenciada pela Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), ao passo que a água salobra foi oriunda de um poço artesiano do Setor de Aquicultura da UFERSA, que coleta água do aquífero Jandaíra, classificado como aquífero livre (Peixoto *et al.*, 2021).

As águas subterrâneas provenientes de poços artesianos na cidade de Mossoró apresentam valor de condutividade elétrica (CE) médio em torno de $0,40 \text{ dS m}^{-1}$ com vazões de $16 \text{ m}^3 \text{ h}^{-1}$ (Silva *et al.*, 2019).

O transporte da água salobra do Setor de Aquicultura ocorreu, semanalmente, com o uso de um reservatório plástico de 1 m^3 até a área experimental de reúso da água do LCRA/UFERSA, conforme Figura 3.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 3. Captação da água do poço do Setor de Aquicultura da UFERSA.

Durante o período experimental, foram coletadas amostras nas três diluições de água salobra nos tempos de operação de 0, 80 e 160 h, as quais foram coletadas no ponto de amostragem localizado a jusante do sistema de filtragem.

As amostras foram encaminhadas ao Laboratório de Análise de Água, Solo e Planta (LASAP/UFERSA) e ao Laboratório Multiusuário de Análise de Água, Solo e Planta do Semiárido (LASAPSA/UFERSA) para caracterização dos seguintes atributos: pH e CE em dS m^{-1} utilizando-se pHmetro e condutivímetro de bancada; potássio (K^+) e sódio (Na^+) disponíveis, em $\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$, obtidos com fotômetro de chama; cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), cloreto disponível (Cl^-), carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonato (HCO_3^-), em $\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$, determinados por titulometria; sólidos suspensos totais (SST) e sólidos dissolvidos totais (SDT), em mg L^{-1} , empregando-se o método gravimétrico.

Nas análises físico-químicas das diluições de água salobra, foram utilizadas as metodologias da EMBRAPA (Parron; Muniz; Pereira, 2011) e do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird; Eaton; Rice, 2017).

Com os valores de Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} , foram calculados a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) proposta por Richards (1954) e a dureza, respectivamente, empregando-se as Equações 1 e 2.

$$\text{RAS} = \frac{\text{Na}^+}{\sqrt{\frac{\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}}{2}}} \quad (1)$$

$$\text{Dur} = (\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}) \cdot 50 \quad (2)$$

Em que:

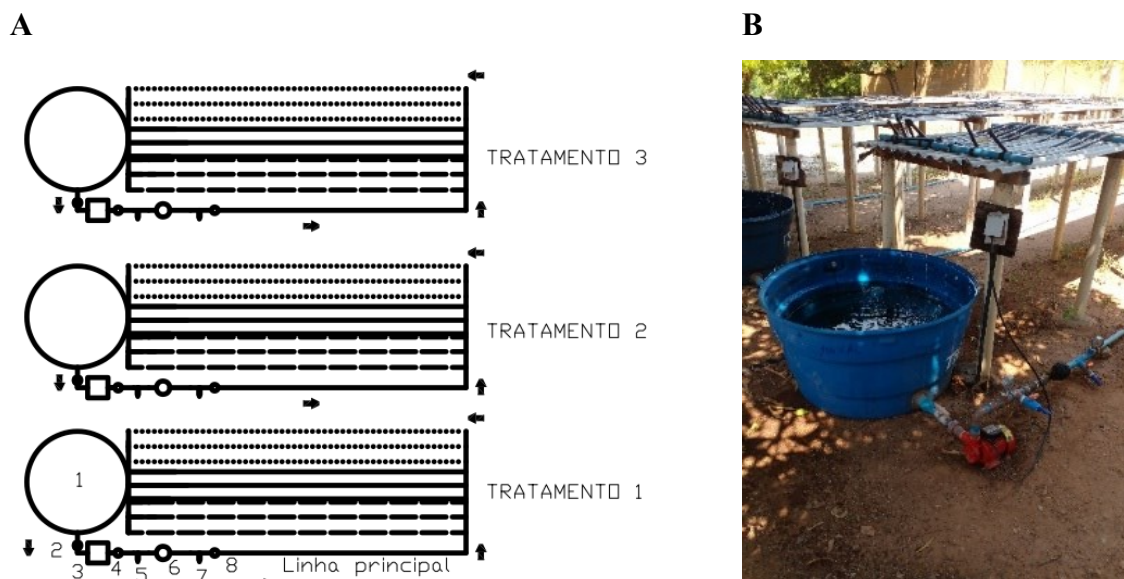
RAS – Razão de Adsorção de Sódio, em $(\text{mmol}_e \text{ L}^{-1})^{0,5}$;

Dur – Dureza, em mg L^{-1} ; e

Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} - Concentrações de sódio, cálcio e magnésio, em $\text{mmol}_e \text{ L}^{-1}$.

Delineamento experimental e montagem das bancadas experimentais

O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subsubdivididas com três repetições (Figura 4), tendo nas parcelas as três diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB) (D1 - 100% de AB; D2 – 50% de AB mais 50% de AS; e D3 - 100% de AS); nas subparcelas, os três tipos de gotejadores não autocompensantes (NJ, SL e ST); e nas subsubparcelas, os nove tempos de avaliação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h), conforme proposto no trabalho de Vale *et al.* (2020).



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 4. Esquema das três bancadas experimentais (A) destacando: (1) Reservatório plástico de $0,31 \text{ m}^3$, (2) Registro de esfera de 32 mm, (3) Motobomba de 0,5 cv; (4) e (8) Manômetros de glicerina (0 a 400 kPa); (6) Filtro de discos de $130 \text{ }\mu\text{m}$, (5) e (7) Pontos para coleta de amostras de água, linhas de irrigação com emissores ST, SL e NJ; e imagem frontal de uma das bancadas (B).

As avaliações foram feitas a cada 20 h, completando um total de 160 h, que corresponde a um ciclo do cultivo do melão no semiárido potiguar e com uma pressão de trabalho de 80 kPa usada na região, obtendo-se nove momentos de avaliação da vazão por tipo de gotejador.

Foram usadas três bancadas, cada uma tendo área superficial de $8,0 \text{ m}^2$, 1 m de largura por 8 m de comprimento. Cada bancada foi constituída por um reservatório plástico ($0,31 \text{ m}^3$), um registro de esfera (32 mm), uma motobomba (0,5 cv), um filtro de discos ($130 \text{ }\mu\text{m}$), dois pontos de coleta de amostras de água, dois manômetros analógicos de glicerina (0 a 400 kPa), uma linha principal (32 mm) com 10 m de comprimento, uma linha de derivação (50 mm) de 1 m de comprimento e nove linhas laterais (16 mm) com 8 m de comprimento, sendo três linhas laterais de cada um dos emissores não autocompensantes ensaiados (Figura 4 e Tabela 1).

Ressalta-se que o diâmetro nominal da linha de derivação (50 mm) foi superior ao da linha principal (32 mm), para facilitar a inserção das borrachas de vedação e dos conectores, possibilitando encaixe e vedação adequados para evitar vazamentos.

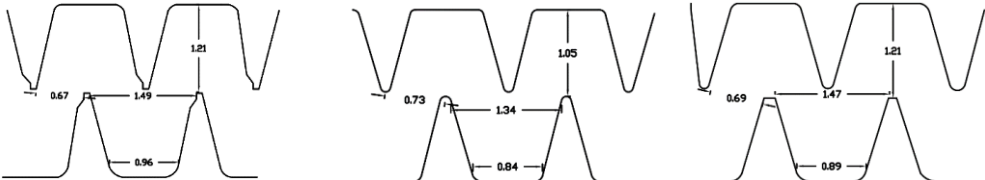
A Tabela 1 apresenta as características hidráulicas, dimensões e imagens dos emissores e seus respectivos labirintos utilizados nos ensaios experimentais. Os emissores ST e NJ possuem maior dimensão no sentido ortogonal à passagem do fluxo ($1,21 \text{ mm}$) em relação ao emissor SL ($1,05 \text{ mm}$); semelhantemente, os gotejadores ST e NJ apresentam maior separação

na parede inferior do labirinto 0,89 e 0,96 mm, respectivamente; por sua vez, o emissor SL apresenta dimensão de 0,84 mm.

Tabela 1. Caraterísticas e dimensionamento dos emissores utilizados no experimento.

Características	NJ	SL	ST
*q (L h ⁻¹)	1,70	1,60	1,60
*K	0,56	0,57	0,53
*x	0,46	0,45	0,48
C x L x P	**16x0,66 x 0,6	*13x0,64x0,60	*18x0,66x0,63

IE



Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: q – Vazão Nominal; K - Constante de proporcionalidade, adimensional; x - Expoente que caracteriza o regime de fluxo, adimensional; C x L x P - Dimensões fabricante (comprimento x largura x profundidade); e IE – Imagens do emissor. * Informações obtidas dos catálogos dos fabricantes. **Medições usando base vetorial obtida por microscopia eletrônica de varredura no Centro de Pesquisa em Ciências Vegetais do Semi-Árido (CPVSA) da UFERSA empregando-se uma câmera Olympus DP72 acoplada a um microscópio óptico da marca Olympus BX51.

Vazão média, classificação de imagens, métricas fractais e análises estatísticas aplicadas

Com o intuito de analisar a diminuição da vazão média, a acumulação de material causador de obstrução dentro do emissor e sua relação com a diluição de água e o tipo de emissor usado, foi realizado processo de digitalização da parte interna dos emissores, como representado na Figura 5.

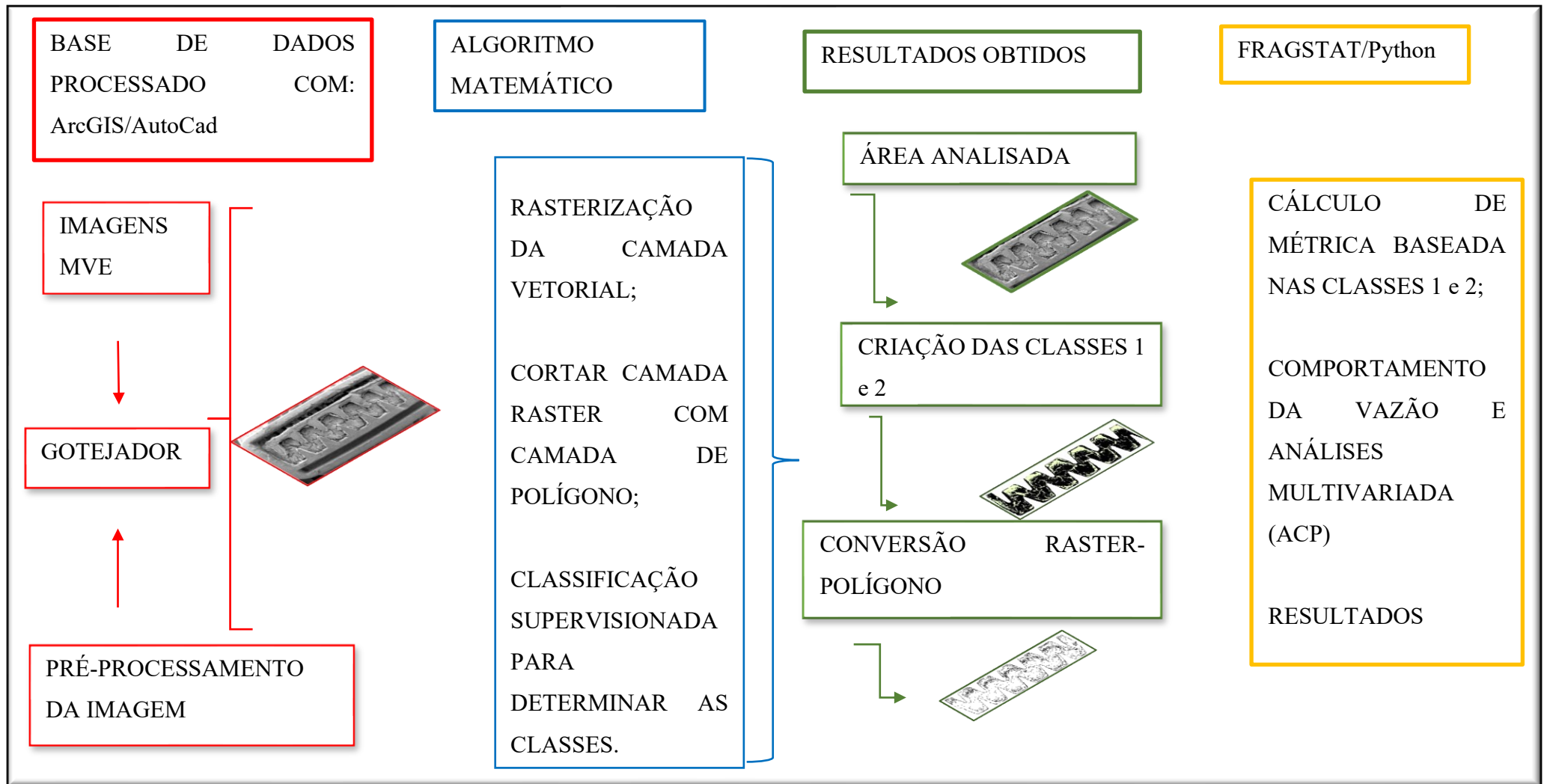


Figura 5. Modelo da estrutura metodológica para análises do material sedimentado nos gotejadores e sua relação com a vazão média.

Análises da vazão média dos emissores

O experimento teve duração de 160 h, equivalente ao tempo de irrigação de um ciclo da cultura do melão na região, sendo que a cada 20 h a vazão de 16 emissores foi medida nas 27 linhas de irrigação. Coletou-se o efluente de cada linha por três minutos, usando recipientes coletores de 200 mL e provetas de 100 mL com precisão de 1 mL. Com a obtenção desses dados, a vazão foi calculada utilizando-se a Equação 3.

$$Q = \frac{V}{1000 t} \cdot 60 \quad (3)$$

Em que:

Q – Vazão do emissor, L h⁻¹;

V – Volume do efluente coletado, mL; e

t – Tempo de coleta do efluente, minutos

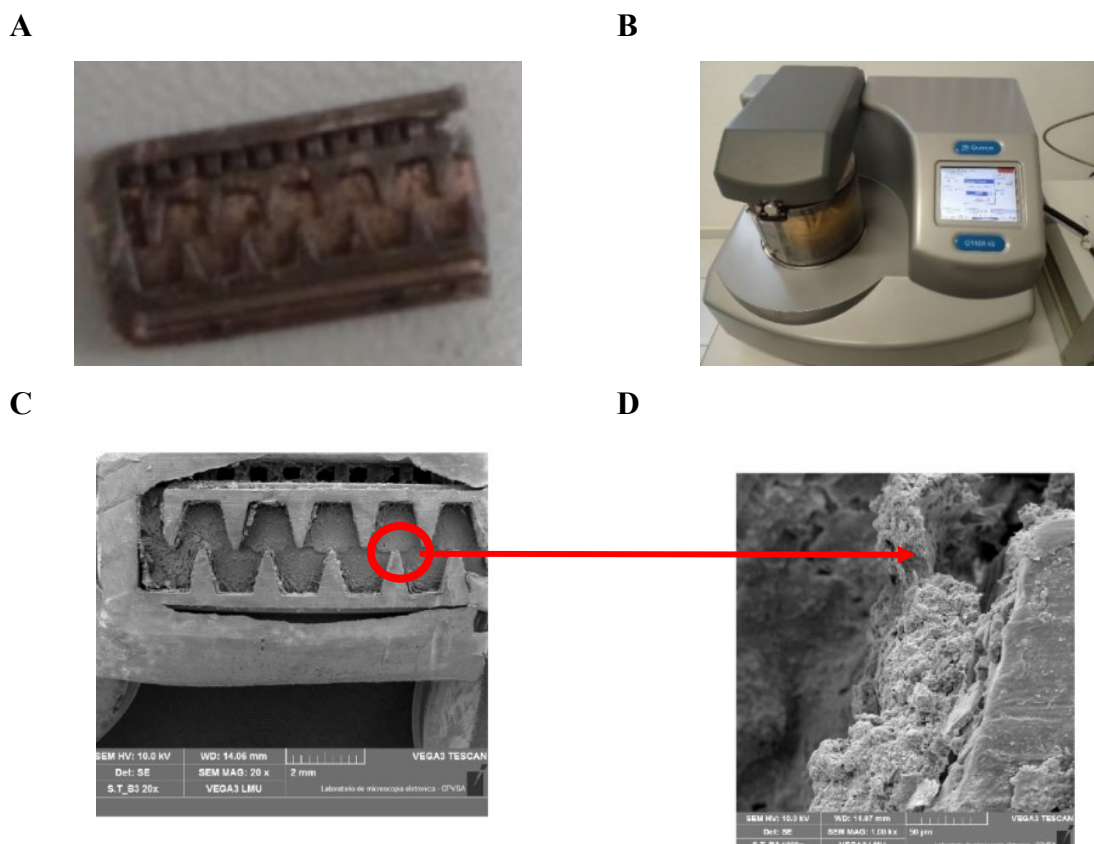
Geração de imagens aplicando Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

O uso de imagens de alta resolução como ferramenta para caracterizar, avaliar, diagnosticar e até mesmo desenhar agentes de obstrução orgânicos e inorgânicos, em situações nas quais a capacidade dos microscópios convencionais é limitada, sendo cada vez mais utilizado em muitos campos científicos. Neste sentido, se destaca a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que trabalha com a emissão de elétrons (Mohammed; Abdulah, 2018).

Com o encerramento do experimento às 160 h de funcionamento das unidades gotejadoras, as linhas laterais foram abertas, gotejadores obstruídos foram selecionados, sendo posteriormente dissecados.

As amostras dos gotejadores obstruídos foram processadas, e as imagens do MEV foram obtidas no Laboratório de Microscopia Eletrônica do Centro de Pesquisa em Ciências Vegetais do Semi-Árido (CPVSA) da UFRSA com equipamento modelo QUORUM. Neste foram registrados um total de 45 imagens, correspondentes aos três tipos de gotejadores, sendo estes NJ, SL e ST, das três bancadas, as quais trabalharam com diluições AS de 0%, 50% e 100%, e com cinco resoluções 20X, 50X, 200X, 500X e 1000X.

Na maior resolução, se obtém o mais alto nível de detalhamento das imagens. A Figura 6 apresenta o equipamento usado e diferentes resoluções das imagens produzidas.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 6. Imagens do: Gotejador com 160 h de operação (A); Equipamento QUORUM (B); Imagem raster com resolução 20X (C); e Imagem raster com resolução 1000X (D).

Classificação utilizada no tratamento dos pixels das imagens

O programa Arcgis 10.3 foi usado para realizar uma classificação supervisionada das imagens obtidas pelo MEV, sendo o objetivo da classificação dos pixels, atribuir a cada célula na área de estudo, uma classe determinada pelo usuário da seguinte forma: A) Vazio (classe 1), nos casos em que se produzem manchas livres do material que causa obstrução; e B) Entupido (classe 2), quando se observam áreas ocupadas por material sedimentado de forma contínua.

Com a informação obtida de cada classe, é possível caracterizar a dinâmica do entupimento dos emissores. A Figura 7 ilustra as classes descritas.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 7. Exemplo da classificação supervisionada e a criação das classes.

A criação das classes foi efetuada por meio da técnica estatística de classificação máximo verossimilhança (CMV), usando o programa ArcGis 10.3, que utiliza uma extensão de treinamento, na qual o usuário obtém as estatísticas multivariadas de cada classe pretendida.

Como resultado, se obtém um mapa que particiona a área de estudo nas classes conhecidas, que correspondem a amostras de treinamento. Estas classes que ocorrem naturalmente formam manchas que podem ser analisados estatisticamente (ESRI, 2011).

A CMV é realizada com base em dois princípios: A) O teorema de Bayes; e B) A suposição de que as amostras de classe são normalmente distribuídas. Se c_i representa a classe i e v representa o vetor de características extraídas das imagens, então de acordo com o teorema de Bayes, tem-se:

$$P(c_i|v) = \frac{P(v|c_i) \times P(c_i)}{P(v)} \quad (4)$$

O vetor de características v pertence a c_i se a probabilidade dada pela equação 4 é a maior entre todas as classes. Pela regra de máxima verossimilhança, obtém-se:

$$P(c_i|v) > P(c_j|v) \quad (5)$$

Onde:

$$P(v) = \sum_{i=1}^N P(v|c_i)XP(c_i) \quad (6)$$

De acordo com Asad e Bais (2020), substituindo 5 em 6 tem-se:

$$P(v|c_i)XP(c_i) > P(v|c_j)XP(c_j) \quad (7)$$

Onde $P(v|c_i)$ é a probabilidade de verossimilhança. Neste estudo, as probabilidades de ambas as classes (classe 1 e 2) são iguais, sendo v normalmente distribuída, $P(v|c_i)$ pode ser obtida com a seguinte equação:

$$P(v|c_i) = (2\pi)^{-0,5} \times |Y_i|^{0,5} \times \exp\left(-\frac{1}{2}(v - z^T) \times Y_i^{-1}(v - z_i)\right) \quad (8)$$

Métricas fractais

As formas das partículas num sistema são bastante estudadas e aplicadas em grande variedade de áreas do conhecimento; por exemplo: o efeito que exercem na durabilidade, resistência ao cisalhamento, resposta à fadiga de estruturas de cimento, propriedades geotécnicas dos solos, medicina, biologia, geografia, meteorologia, ciência dos materiais, dentre outras.

No entanto, existem poucos estudos sobre os efeitos das formas fractais de agentes ocasionadores de obstrução atuando nos gotejadores de sistemas de irrigação localizada que utilizam água com níveis de salinidade (Arasan *et al.*, 2011; Shklarsky; Livneh, 1964).

O conceito matemático de fractais para descrever geometrias irregulares de superfícies é relativamente novo (Mandelbrot, 1977). O parâmetro chave para a análise fractal é a dimensão fractal, a qual é um número real não inteiro, sendo, desta forma, diferente das análises mais familiares da geometria Euclidiana ou do dimensionamento topológico convencional. A dimensão fractal de uma linha com qualquer forma varia entre um e dois; para uma superfície, por sua vez, varia entre dois e três (Arasan *et al.*, 2011).

A geometria das partículas pode ser totalmente expressa em termos de três propriedades independentes, sendo estas: A) Forma; e B) Angularidade (arredondamento); e C) Textura da superfície (Barret *et al.*, 1980). Um aspecto muito importante é que a forma, arredondamento e textura são propriedades totalmente independentes, isto significa que uma pode variar sem afetar as outras duas propriedades. A forma de uma partícula interfere nas variações de

proporcionalidade; por sua vez, o arredondamento expressa variações nas quinas e, finalmente, a textura descreve a textura superficial.

Para um grupo de conjuntos de formas semelhantes no espaço bidimensional, a razão do perímetro (L) e área (A) é seguinte: $\rho = L/\sqrt{A}$; por exemplo, se o conjunto consiste de círculos, quadrados e triângulos equiláteros, os valores ρ são: $2\sqrt{\pi}$, 4 e $6/3^{1/4}$, respectivamente (Mandelbrot, 1983). Muitos métodos têm sido desenvolvidos para determinar as dimensões fractais (área/perímetro, contagem de caixas, Lei de Kocak, espectro de potência), mas a maioria tem as suas limitações práticas e/ou teóricas (Barret *et al.*, 1980; Klinkenberg, 1994; Mandelbrot, 1977; Mandelbrot, 1983).

A determinação da dimensão fractal de características lineares (formações naturais com uma dimensão topológica) é um processo aplicado em ampla variedade de campos como, por exemplo, fotografia de vegetação, imagens digitais de crateras no planeta Marte, digitalização de costas marinhas, dentre outras (Goodchild, 1982; Macgarigal *et al.*, 2002; Morse *et al.*, 1985; Woronow, 1981). Neste estudo, foi usado o programa FRAGSTAT 4.0 para calcular as seguintes métricas fractais das classes 1 e 2:

1. Quantidade de manchas: Refere-se ao número de manchas identificadas de uma classe particular;

2. Área média (Amed): é a área correspondente a um conjunto de manchas identificadas e agrupadas em classes definidas pelo usuário;

3. Métrica fractal de forma (SHAPE): é a medida mais simples e talvez mais direta da complexidade da forma. Valores iguais a 1 indicam partículas de formato quadrado; o valor pode incrementar sem limites, indicando formas mais irregulares. A métrica *SHAPE* foi calculada usando a Equação 9.

$$SHAPE = \frac{0,25P_{ij}}{\sqrt{a_{ij}}} \quad (9)$$

Em que:

P_{ij} - Perímetro da mancha ij , m; e

a_{ij} - Área da mancha ij , m^2 .

4. Círculo circunscrito relacionado (*CIRCLE*): aproxima-se de 0 para partículas circulares e aproxima-se de 1 para partículas alongadas e lineares. A métrica *CIRCLE* foi calculada usando a Equação 10.

$$CIRCLE = 1 - \left[\frac{a_{ij}}{a_{ijs}} \right] \quad (10)$$

Em que:

a_{ij} - Área da mancha ij , m^2 ; e

a_{ijs} - Área menor círculo circunscrito em torno da mancha, m^2 .

4. Porcentagem de ocupação (*PLAND*): é a porcentagem de ocupação de determinada classe. A métrica *PLAND* foi calculada usando a Equação 11.

$$PLAND = P_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{A} \cdot (100) \quad (11)$$

Em que:

P_i - Proporção de área ocupada por uma classe;

a_{ij} - Área da mancha ij ; e

A - Área total.

Análise multivariada

No presente estudo, as análises multivariadas das variáveis diluições, emissores, quantidade de manchas da classe 2, área média de manchas da classe 2, área média de manchas da classe 1, métrica *PLAND* da classe 1 e vazões médias dos gotejadores compreenderam a realização da matriz de correlação de Pearson e, posteriormente, a análise de componentes principais (ACP), seguindo as recomendações de Vicini *et al.* (2018).

Iniciaram-se as análises de estatística multivariada com a obtenção da matriz de correlação de Pearson, em que os valores de r de -1 e +1 demonstram maior correlação, ao passo que valores próximos de zero indicam ausência de correlação entre as duas variáveis analisadas (Oliveira Júnior *et al.*, 2021). A matriz de correlação de Pearson foi obtida pelo pacote estatístico da linguagem de uso livre Python 3.0 (McKinney; Team, 2012; Tan *et al.*, 2021).

Na Tabela 2, apresenta-se a classificação do coeficiente de correlação (r) proposta por Schober, Boer e Schwarte (2018).

Tabela 2. Classificação do coeficiente de correlação (r).

Valores absolutos	Classificação
0,00 – 0,10	Insignificante
0,10 – 0,39	Correlação fraca
0,40 – 0,69	Correlação moderada
0,70 – 0,89	Correlação forte
0,90 – 1,00	Correlação muito forte

Fonte: Schober, Boer e Schwarte (2018).

O objetivo do ACP é extrair as informações importantes dos dados, representá-las como um conjunto de novas variáveis chamadas componentes principais e exibir o padrão de semelhança das observações e das variáveis como pontos em um gráfico (Abdilynne; Williams, 2010), possibilitando a compreensão de quais variáveis influenciaram na alteração da vazão média das unidades gotejadoras que operaram com diluições de água salobra.

Complementando, utilizou-se na ACP do presente estudo a rotação Oblimin e em todas as análises da ACP empregou-se um código próprio, com a linguagem de uso livre Python 3.0 apresentada no anexo A. Para isso, utilizaram-se os seguintes pacotes estatísticos do Python: A) Pandas; B) Seaborn; C) matplotlib; D) Scypi.stat; e E) numpy (Mckinney; Team, 2012; Tan *et al.*, 2021).

O pacote Pandas fornece estruturas de dados de forma rápida, flexível e expressiva, conseguindo-se armazenar e manipular dados; por sua vez, o pacote Seaborn foi usado na confecção dos gráficos, ao passo que o pacote matplotlib permitiu a realização de ajustes nos gráficos; o pacote Sypy.stat possui grande número de distribuições de probabilidade, estatísticas de frequência, funções de correlação e testes estatísticos, estimativa de densidade de kernel, método Monte Carlo e outras. Finalmente, o pacote Numpy foi empregado para realizar alguns dos cálculos efetuados no presente trabalho.

Neste trabalho, foram estruturados dois módulos: A) Um módulo de importação dos pacotes estatísticos necessários e a entrada dos dados das variáveis dependentes e independentes em formato xlsx; e B) Um segundo módulo destinado à compilação do arquivo xlsx e à geração dos fatores e autovalores que explicam a variância dos dados; além disso, o teste de Barlett e adequação do modelo ou Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) foram realizados.

A ACP relacionou as variáveis vazão média dos gotejadores, diluições e tipo de emissores com as métricas fractais: A) Quantidade de manchas da classe 2; B) Áreas médias de manchas (classe 1 e 2); e C) Porcentagem de ocupação/PLAND (classe 1).

Ressalta-se que o teste estatístico KMO é uma medida de adequação da amostragem, sendo um tipo de estatística que indica a proporção de variância nas variáveis em estudo que pode ser causada por fatores subjacentes. Se as variáveis compartilham fatores comuns, então as correlações parciais devem ser pequenas e o KMO deve estar próximo de 1,0.

Valores de KMO superiores a 0,8 podem ser considerados bons, ou seja, uma indicação de que a ACP será útil às variáveis estudadas. Valores de KMO inferiores a 0,5 requerem medidas corretivas, tanto a partir da eliminação das variáveis sem correlação quanto por meio da inclusão de outras variáveis (Cerny; Kaiser, 1977).

Por sua vez, o teste de esfericidade de Bartlett possibilita a análise da hipótese de que a matriz de correlação é uma matriz de identidade, o que indicaria que as variáveis não estão relacionadas e, portanto, não são adequadas para detecção da estrutura.

Na ACP, foram considerados os autovalores iguais e superiores a um, bem como as variâncias totais acumuladas iguais ou superiores a 70% (Cliff, 1988; Oliveira Júnior *et al.*, 2021).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Qualidade das diluições de água salobra em água de abastecimento

Apresentam-se, na Tabela 3, as características físico-químicas das diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB) utilizadas no abastecimento das unidades gotejadoras dotadas dos três tipos de gotejadores não autocompensantes.

Percebeu-se, nessa tabela, que o valor do pH variou entre 7,9 a 9,1. Neste sentido, Shi *et al.* (2022) afirmaram que os valores de pH acima de 8 aumentam a probabilidade de entupimento de gotejadores pelo fato de propiciarem a precipitação do bicarbonato de cálcio (Zhangzhong *et al.*, 2019).

Tabela 3. Características físico-químicas das diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB).

Características	Tempo de operação (h)								
	0			80			160		
	Diluições								
	D1	D2	D3	D1	D2	D3	D1	D2	D3
pH	8,40	8,30	8,10	9,10	8,80	8,90	8,10	8,00	7,90
CE (dS m ⁻¹)	0,60	3,50	5,50	0,50	3,40	5,00	0,60	4,30	5,20
K ⁺ (mmolcL ⁻¹)	0,30	0,60	0,80	0,30	0,90	1,20	0,60	4,30	5,20
Na ⁺ (mmolcL ⁻¹)	5,80	19,90	29,0	4,30	22,90	35,30	5,50	19,90	32,40
Ca ²⁺ (mmolcL ⁻¹)	0,90	12,80	19,30	0,60	13,60	21,10	0,60	15,40	33,00
Mg ²⁺ (mmolcL ⁻¹)	0,50	12,80	20,60	1,00	18,80	28,60	0,60	16,80	27,30
Cl ⁻ (mmolcL ⁻¹)	2,40	26,00	37,6	3,40	36,00	56,00	2,70	27,20	57,00
CO ₃ ²⁻ (mmolcL ⁻¹)	0,60	0,60	0,60	0,40	0,60	1,00	0,50	0,40	0,80
HCO ₃ ⁻ (mmolcL ⁻¹)	3,90	4,70	5,60	2,30	2,80	3,20	3,10	3,60	4,20
SST (mg L ⁻¹)	0	4	28	0	4	28	2	26	50
SDT (mg L ⁻¹)	85	456	837	96	1.121	1.747	108	1.199	4.475
RAS (mmolcL ⁻¹) ^{0,5}	6,9	5,6	6,5	4,8	5,7	7,1	7,3	5,0	5,9
Dureza (mg L ⁻¹)	70	1280	1995	80	1.620	2.485	57	1.610	3.015

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: CE – Condutividade elétrica; SST – Sólidos suspensos totais, SDT – Sólidos dissolvidos totais, RAS – Razão de adsorção de sódio, D1 - 100% de AB mais 0% de AS, D2 – 50% de AB mais 50% de AS e 0% de AA mais 100% de AS.

Os valores de pH obtidos no presente estudo são bastante similares às diluições de água produzida do petróleo tratada com água subterrânea, pH entre 8,78 e 8,87, conforme o estudo de Costa *et al.* (2019). A CE apresentou variação de 0,60 a 5,5 dS m⁻¹, em que os maiores valores ocorrem nas diluições D2 e D3, com maiores proporções de água salobra.

Os valores obtidos de CE são mais altos que os obtidos por Costa *et al.* (2019), entre 0,52 a 0,82 dS m⁻¹, e por Vale *et al.* (2020), entre 0,72 e 0,75 dS m⁻¹, ambos em estudos com diluições água produzida do petróleo tratada.

Nas diluições D2 e D3, foram percebidos elevados teores de Ca²⁺ e Mg²⁺ em relação à diluição D1. Nestas condições, Liu *et al.* (2023) explicaram que surgem correlações significativas entre Ca²⁺, Mg²⁺ e pH e incrustações orgânicas e inorgânicas em gotejadores que aplicam água salobra.

Quanto ao risco de obstrução de gotejador, a CE apresenta: A) Risco severo (> 4,5 dS m⁻¹) para D3; B) Risco moderado para D2 (1,0 ≤ CE ≤ 4,5 dS m⁻¹); e C) Risco menor (< 1,0 dS m⁻¹) para D1 (Capra; Sciclone, 1998).

Em relação ao íon K⁺, os teores foram maiores em D3 do que em D1 e D2 devido ao aporte de K⁺ da água de poço. Este íon pode influenciar na formação de precipitados nos gotejadores, acarretando problemas de obstrução (Ayers; Westcot, 1999).

Além disso, fertilizantes fosfatados com a presença do potássio, tais como fosfato de potássio monobásico e fosfato monopotássico, também podem afetar muito o entupimento de emissores (Shi *et al.*, 2022).

Em outro estudo com fertilizantes, Ribeiro, Coelho e Teixeira (2010) constataram que o uso de cloreto de potássio (nas formas branca e vermelha) na fertirrigação, tanto em gotejadores autocompensantes quanto em gotejadores não autocompensantes, resultou em diferentes níveis de entupimento.

No geral, houve maior obstrução de gotejadores. No presente estudo, nas diluições D2 e D3, que possuíam maiores riscos de entupimento por agentes químicos em relação a diluição D1. Provavelmente os maiores valores de CE, Ca²⁺ e Mg²⁺ nestas diluições contribuíram para os maiores níveis de entupimento, corroborando o estudo de Vale *et al.* (2018), no qual Ca²⁺ teve grande importância no entupimento de gotejadores que aplicaram percolado de aterro sanitário diluído e com Araujo *et al.* (2020), que detectaram o Mg²⁺ como fator relevante no entupimento de gotejadores.

Um composto químico que induz o entupimento dos emissores é o bicarbonato (HCO₃⁻), havendo maior risco de formação de incrustações quando o pH é superior a 7,5 e o teor de HCO₃⁻ é maior que 5 mmol L⁻¹ (Ayers; Westcot, 1999). O carbonato (CO₃²⁻) é um dos ânions que em grande concentração incrementam a salinidade das águas; com relação à dureza (Ca²⁺ + Mg²⁺), valores superiores a 300 mg L⁻¹ indicam risco de entupimento severo (Muniz *et al.*, 2022), o que também pode explicar os maiores níveis de obstrução nas diluições D2 e D3.

Maiores concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT) ocorrem no fim do experimento (4.475 mg L^{-1}), o que pode ser explicado pela acumulação de material precipitado no interior das linhas. A concentração de SDT na diluição D3 foi de 4.475 mg L^{-1} , muito maior do que os 1.250 mg L^{-1} , resultando em problema de entupimento dos emissores no trabalho de Shi *et al.* (2022).

A maior razão de adsorção de sódio (RAS) ocorreu na diluição D1 de 160 h. Analisando conjuntamente o valor da RAS e da CE de D1 às 160 h, tem-se risco de redução da infiltração de água no solo classificada como pequena a moderada (Ayers; Westcot, 1999).

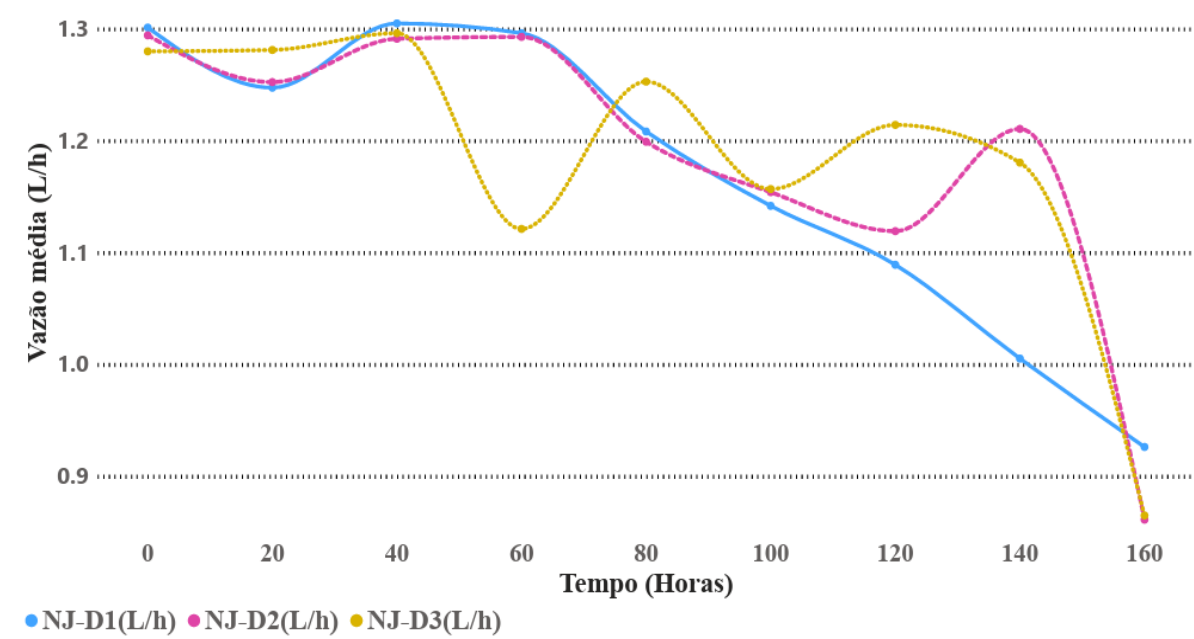
Além do Cl^- ser um íon associado a problemas de salinidade no solo, quando águas com altos teores desse elemento são usadas para irrigação, do ponto de vista de toxicidade das plantas, os valores resultantes de Cl^- indicam um grau de restrição de irrigação por superfície severo ($> 10 \text{ mmol}_e \text{ L}^{-1}$) nas diluições D2 e D3 (Matos; Matos, 2017).

Em particular, quando a água evapora na saída do emissor, os íons presentes na água ficam supersaturados quando a temperatura é alta, potencializando a geração de incrustações inorgânicas, porém a presença de íons na água de irrigação pode promover a floculação e sedimentação de partículas, resultando na formação de incrustações dentro do canal de fluxo do emissor (Yuan *et al.*, 2023). Os fatores supersaturação de íons, floculação e sedimentação de partículas podem ter provocado obstrução dos emissores do presente estudo.

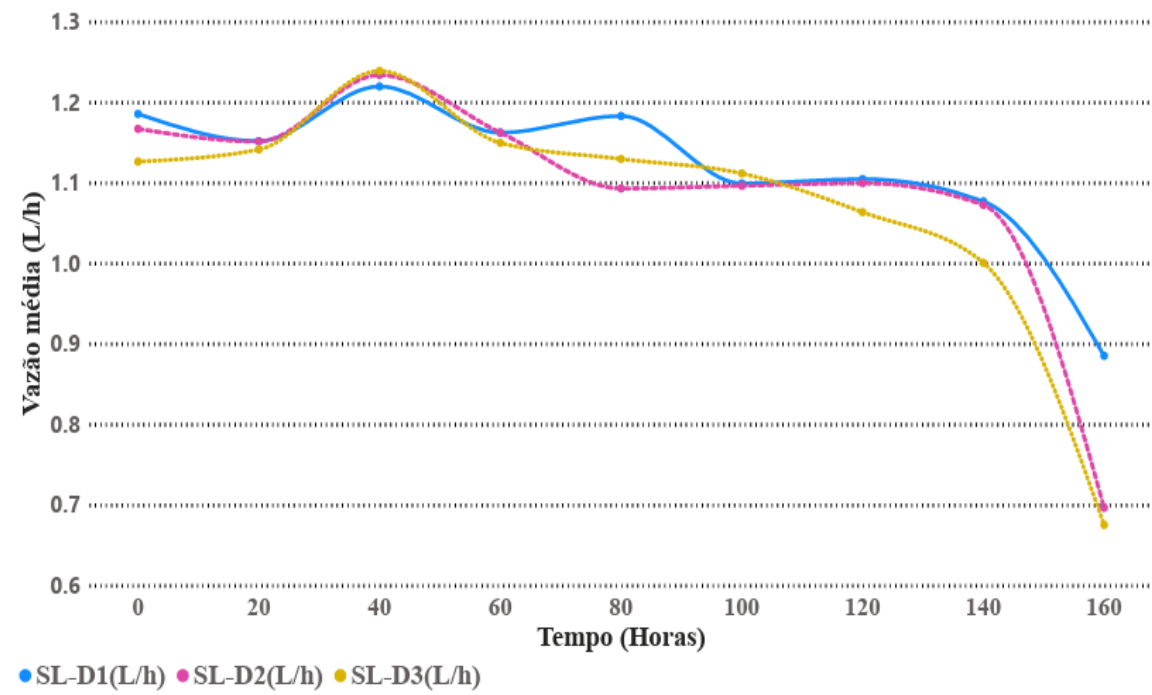
Caracterização do comportamento da vazão nos gotejadores (vazões médias)

A Figura 8 apresenta o comportamento das vazões médias dos gotejadores em função do tempo de operação, mediante as três diluições (D1 – 100% de AB; D2 – 50% de AB mais 50% de AS; e D3 – 100% de AS).

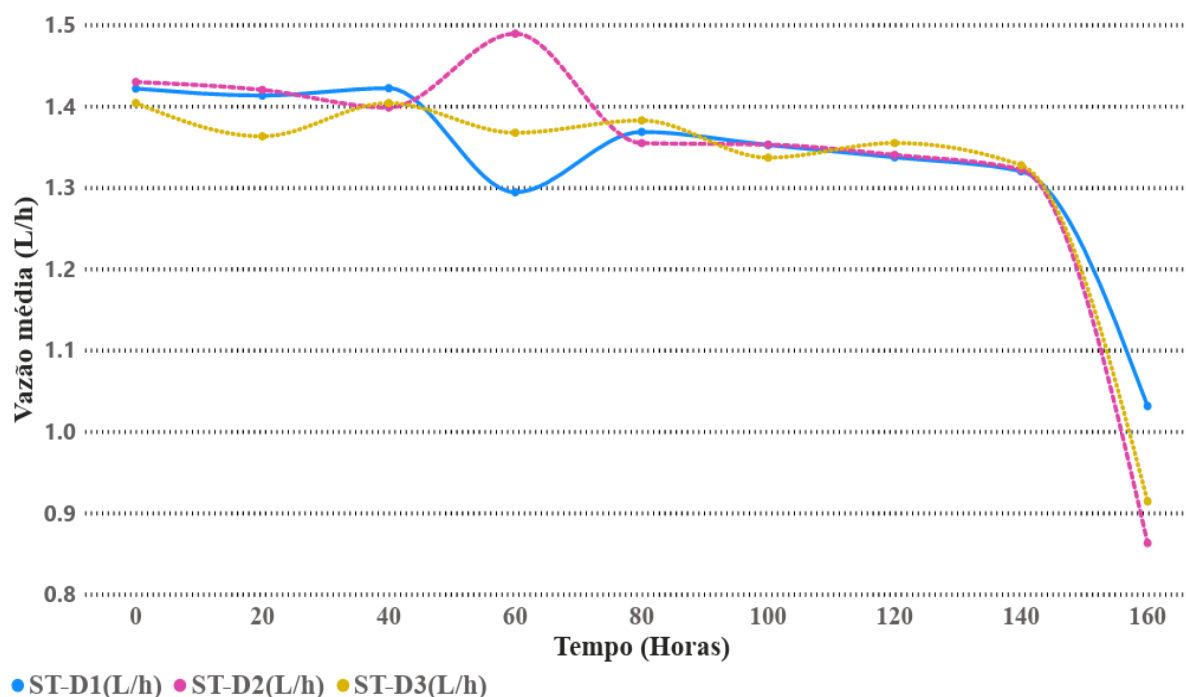
A



B



C



Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: NJ, SL e ST – Tipos de gotejadores; e D1, D2 e D3 – Diluições de águas salobra em água de abastecimento.

Figura 8. Comportamento das vazões dos emissores em função do tempo.

Ao longo do tempo de operação, houve declínio dos valores de vazão dos gotejadores, intensificado no período entre 140 a 160 h para todos dos tipos de gotejadores e diluições, exceto na combinação NJ-D1.

Ao fim dos ensaios experimentais (160 h), a combinação ST-D1 apresentou a menor suscetibilidade ao entupimento. Entretanto, a maior suscetibilidade ao entupimento ocorreu na combinação SL-D3, provavelmente devido às menores dimensões do labirinto, aliado à formação de incrustação no gotejador em virtude de atributos químicos da água salobra (Yuan *et al.*, 2023).

Semelhantemente, em um estudo com gotejadores não autocompensantes aplicando água produzida de petróleo tratada, por um período de 160 h, houve a maior redução da vazão no gotejador SL (Teixeira *et al.*, 2020).

No trabalho de Lili *et al.* (2021), notou-se também incremento nos níveis de entupimento dos gotejadores quando os níveis de salinidade da água de irrigação foram aumentados, corroborando os resultados do presente estudo.

Características das métricas nas análises e configuração espacial das classes 1 e 2

A Tabela 4 apresenta os resultados das principais métricas calculadas, conjugando-se cada emissor com sua respectiva diluição e classe. A partir destes valores, estimou-se quais métricas influenciam a criação das classes vazio e entupido e, conseqüentemente, o comportamento da vazão dos gotejadores ao longo do tempo de operação, por meio dos modelos estatísticos usados no presente trabalho.

Observou-se nessa tabela que a maior quantidade de manchas ocorreu na combinação SL-D1 das classes 1 e 2, cabendo salientar que este tipo de gotejador apresenta as menores dimensões internas do labirinto, porém os menores valores para ambas as classes foram detectados na combinação ST-D3, emissor que tem as maiores dimensões internas no labirinto. As maiores áreas médias de manchas surgiram nas combinações SL-D1 da classe 1 e ST-D3 da classe 2.

Tabela 4. Métricas das classes vazio e entupido detectadas nos emissores que aplicaram diluições de água salobra.

Combinações	Classes	Quantidade de manchas	Área média de mancha (mm ²)	SHAPE	CIRCLE	PLAND (%)
NJ-D1	Classe 1	776,00	2,77E-03	1,30	0.37	13,82
NJ-D1	Classe 2	274,00	4,82E-02	1,22	0.34	86,18
NJ-D2	Classe 1	1.146,00	2,92E-03	1,36	0.51	21,26
NJ-D2	Classe 2	340,00	3,66E-02	1,25	0.42	78,74
NJ-D3	Classe 1	1.368,00	1,40E-03	1,18	0.46	13,13
NJ-D3	Classe 2	223,00	6,28E-02	1,27	0,43	86,87
SL-D1	Classe 1	1.364,00	6,52E-03	1,29	0,44	67,62
SL-D1	Classe 2	2.614,00	1,62E-03	1,27	0,45	32,38
SL-D2	Classe 1	835,00	2,27E-03	1,27	0,44	18,33
SL-D2	Classe 2	245,00	3,45E-02	1,27	0,47	81,67
SL-D3	Classe 1	691,00	1,45E-03	1,19	0,31	8,55
SL-D3	Classe 2	118,00	9,09E-02	1,34	0,32	91,45
ST-D1	Classe 1	503,00	2,85E-03	1,23	0,30	10,48
ST-D1	Classe 2	239,00	5,16E-02	1,24	0,35	89,52
ST-D2	Classe 1	881,00	1,69E-03	1,27	0,37	11,11
ST-D2	Classe 2	155,00	7,73E-02	1,32	0,36	88,89
ST-D3	Classe 1	346,00	9,28E-04	1,15	0,34	2,60
ST-D3	Classe 2	22,00	5,44E-01	1,65	0,27	97,40

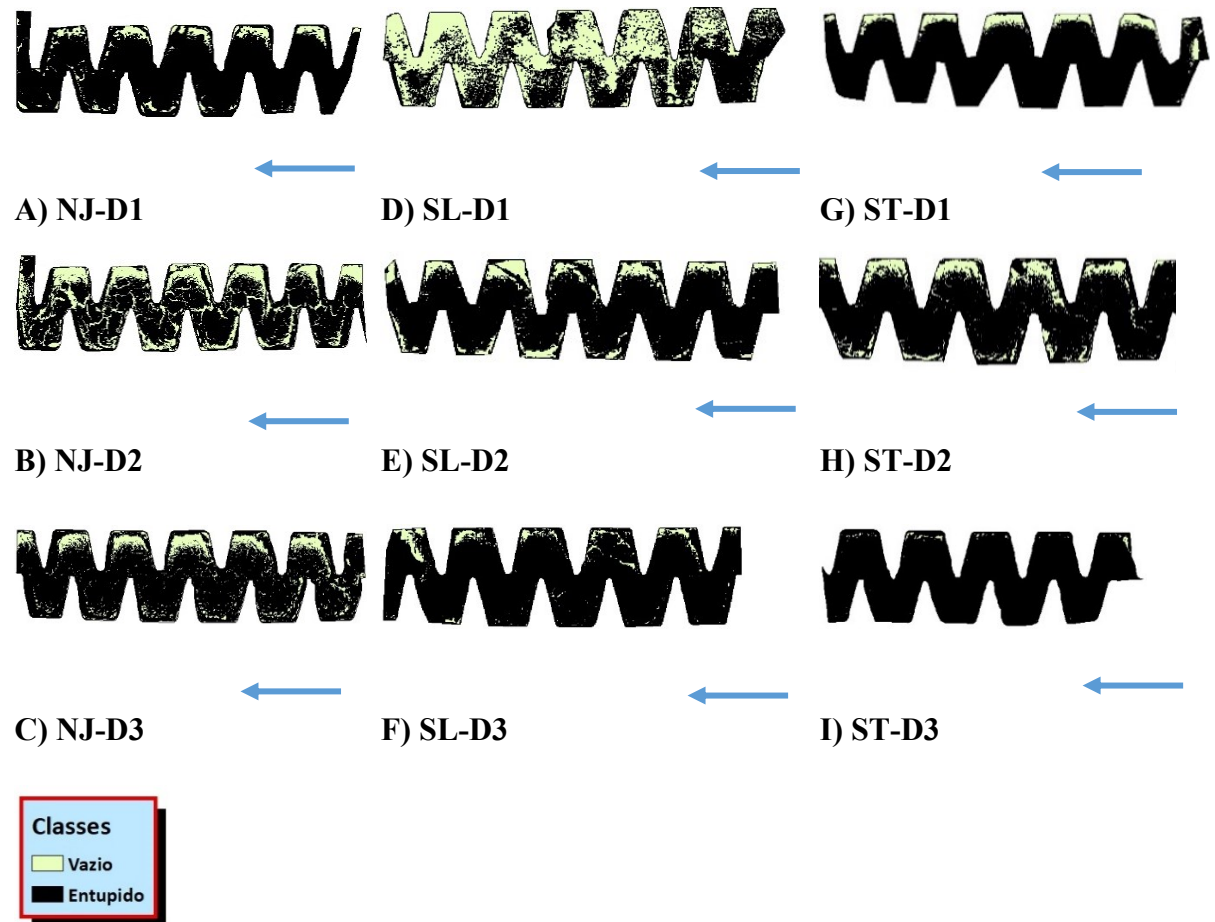
Fonte: Autoria Própria (2024).

Em relação à métrica *SHAPE* da classe 1, os valores obtidos variaram de 1,15 a 1,36 com média de 1,25; o valor mais baixo desta métrica foi detectado na combinação ST-D3, indicando formatos menos irregulares, porém o máximo valor ocorreu na combinação NJ-D2, o que sugere formatos mais irregulares. No caso da classe 2, a métrica *SHAPE* oscilou de 1,22 a 1,65, com média de 1,31, com o menor valor na combinação NJ-D1 e o maior na ST-D3.

Os valores da métrica *CIRCLE* da classe 1 variaram de 0,30 a 0,51, tendo média de 0,40, indicando formas com tendência à circularidade; por sua vez, na classe 2 houve oscilação de 0,27 a 0,47, sugerindo formatos com maior tendência a serem alongados. Finalmente, a métrica *PLAND* da classe 1 resultou em valores de 2,60 a 21,26, sendo a ocorrência do menor valor na combinação ST-D3 e maior na NJ-D2; na classe 2, ocorreu variação de 32,38 a 97,4, sendo o menor valor o da combinação SL-D1 e o maior o da ST-D3.

As Figuras 9 A, B e C apresentam a distribuição espacial das classes formadas no emissor SL aplicando as três diluições, em que se observam maiores espaços vazios, na diluição D2. Este emissor tem as menores dimensões no interior do labirinto, provavelmente devido ao seu maior entupimento de labirinto. As setas em cor azul representam a entrada e direção do fluxo nos emissores.

Por sua vez, as Figura 9 D, E e F mostram a formação de manchas no emissor SL, evidenciando-se maior quantidade de espaços vazios na diluição D1, entretanto D2 e D3 apresentam uma configuração de manchas similar. Finalmente, as Figuras 9 G, H e I representam a formação de manchas no emissor ST, observando-se que D1 e D3 tiveram comportamento similar em relação à formação de manchas; em relação a D2, notou-se maior quantidade de espaços vazios.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 9. Distribuição espaciais das classes 1 e 2 nos três tipos de gotejadores submetidos às diluições de água salobra.

Análise multivariada aplicada à relação da vazão e coeficientes fractais dos gotejadores aplicando diluições de água salobra

Os dados usados na geração da ACP são apresentados na Tabela 5, na qual as variáveis independentes são as diluições e os emissores; por sua vez, as variáveis dependentes são a quantidade de manchas da classe 2, a área média das classes 1 e 2, a métrica PLAND da classe 1 e as vazões médias dos gotejadores.

Tabela 5. Dados usados para gerar a Análise de Componentes Principais (ACP)

A	B	C	D	E	F	G
D1	NJ	274,00	4,80E-02	2,80E-03	13,82	0,93
D1	SL	2.614,00	1,60E-03	6,50E-03	67,62	0,89
D1	ST	239,00	5,20E-02	2,90E-03	10,48	1,03
D2	NJ	340,00	3,70E-02	2,90E-03	21,26	0,86
D2	SL	245,00	3,50E-02	2,30E-03	18,33	0,70
D2	ST	155,00	7,70E-02	1,70E-03	11,11	0,86
D3	NJ	223,00	6,30E-02	1,40E-03	13,13	0,87
D3	SL	118,00	9,10E-02	1,50E-03	8,55	0,68
D3	ST	22,00	5,40E-01	9,30E-04	2,60	0,91

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: A – Diluições D1, D2 e D3; B – Emissores NJ, SL e ST; C - Quantidade de manchas da classe 2; D - Área média de manchas da classe 2; E - Área média de manchas da classe 1; F - Métrica PLAND da classe 1; e G - Vazões médias dos gotejadores.

A maior quantidade de manchas da classe 2 ocorreu na diluição D1 para o emissor SL. Constatou-se também que a área média da classe 2 foi a mais baixa, entretanto a área de mancha da classe 1 foi a mais elevada, assim como a métrica PLAND.

Evidenciou-se que a menor quantidade de manchas ocorreu na diluição D3 do emissor ST, neste caso a área média da classe 2 foi a maior, mas a área média da classe 1 foi a mais baixa, assim como a métrica PLAND da classe 1.

Consta na Tabela 6 a matriz de correlação de Pearson das variáveis vazão e coeficientes fractais dos gotejadores aplicando diluições de água salobra. Nesta tabela, observou-se quatro correlações iguais ou superiores 0,70 (Vicini *et al.*, 2018), o que significa que a correlação entre as variáveis está de forte a muito forte, conforme critério de Schober, Boer e Schwarte (2018), apresentado na Tabela 2.

Tabela 1. Matriz de correlação de Pearson das variáveis vazão e coeficientes fractais dos gotejadores aplicando diluições de água salobra.

Variáveis	A	B	C	D	E	F	G
A	1,00						
B	0,00	1,00					
C	-0,49	-0,08	1,00				
D	0,52	0,46	-0,32	1,00			
E	-0,73	-0,14	0,94	-0,49	1,00		
F	-0,51	-0,18	0,98	-0,43	0,95	1,00	
G	-0,52	0,19	0,12	0,13	0,23	0,04	1,00

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: Correlações significativas ($p \leq 0,70$). A – Diluições D1, D2 e D3; B – Emissores NJ, SL e ST; C - Quantidade de manchas da classe 2; D - Área média de manchas da classe 2; E - Área média de manchas da classe 1; F - Métrica PLAND da classe 1; e G - Vazões médias dos gotejadores.

Houve correlação forte negativa entre as variáveis área média de manchas da classe 1 e diluições (-0,73), bem como correlações muito fortes positivas entre as variáveis área média de manchas da classe 1 e quantidade de manchas da classe 2 (0,94), métrica PLAND da classe 1 e quantidade de manchas da classe 2 (0,98) e métrica PLAND da classe 1 e área média de manchas da classe 1 (0,95), indicando que a correlação mais importante (próxima de 1) entre as variáveis foi entre a métrica PLAND da classe 1 e quantidade de manchas da classe 2.

No caso da correlação forte negativa entre as variáveis área média de manchas da classe 1 e diluições, tem-se influência da maior proporção de água salobra na área média de espaços vazios, ou seja, quanto maior for a proporção de água salobra na diluição em relação à água limpa menor será a área média de espaços vazios, provavelmente devido à presença de material causador de obstrução nos emissores.

Para a correlação forte positiva entre as variáveis área média de manchas da classe 1 e quantidade de manchas da classe 2, evidenciou-se que todo aumento da área média dos espaços de vazios também incrementa a quantidade de espaços entupidos.

Nesse sentido, também foi forte e positiva a correlação entre métrica PLAND da classe 1 e quantidade de manchas da classe 2, ou seja, à medida que a porcentagem de ocupação de espaços vazios aumenta também aumenta a quantidade de espaços entupidos.

Por fim, notou-se que foi forte e positiva a correlação entre as variáveis métrica PLAND da classe 1 e área média de manchas da classe 1, em que aumentos da ocupação de espaço de vazios também incrementam a área média ocupada por espaços vazios.

Por sua vez, apresenta-se na Tabela 7 o resumo dos testes Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Barlett, em que o valor de adequação da amostragem KMO de 0,62 e nível de significância de 0,1% possibilitam o uso da ACP para os dados do presente estudo.

Tabela 2. Resumo dos testes Kaiser-Meyer-Olkin (KMO) e de Barlett.

Medida de adequação da amostragem KMO		0,62
Teste de esfericidade de Bartlett	Aprox. qui-quadrado	49,25
	Significância	0,0005***

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: *** Significativo a 0,1% de probabilidade.

Na Tabela 8, apresenta-se o resultado dos autovalores, bem como a porcentagem da variância explicada por cada componente, além da variância acumulada pelas três componentes principais extraídas.

Tabela 3. Autovalores e percentual de variância explicada de cada componente.

Número de componentes	Autovalores	Variância explicada (%)	Variância explicada acumulada (%)
1	3,71	53,04	53,04
2	1,51	21,52	74,56
3	1,01	14,49	89,05
4	0,59	8,42	
5	0,16	2,28	
6	0,01	0,15	
7	0,01	0,09	

Fonte: Autoria Própria (2024).

Foram selecionadas as três primeiras componentes da Tabela 8 por apresentarem variância acumulada igual ou superior a 70% e autovalores iguais ou superiores a um (Vicini *et al.*, 2018). Observou-se nessa tabela que os três primeiros autovalores representam cerca de 89,05% da variância. Portanto, os dados foram resumidos pelas três primeiras componentes principais, que representam o conjunto de variáveis originais. Dentre as três componentes, a componente 1 foi a mais importante porque possuía 53,04% da variância.

Na Tabela 9 está apresentada a matriz de correlação entre as variáveis diluições, emissores, métricas fractais e vazões dos gotejadores e as componentes principais de cada variável. Nesta análise empregou-se a método de rotação Oblimin.

Tabela 4. Matriz de correlação entre as variáveis diluições, emissores, métricas fractais e vazões dos gotejadores e as componentes principais de cada variável.

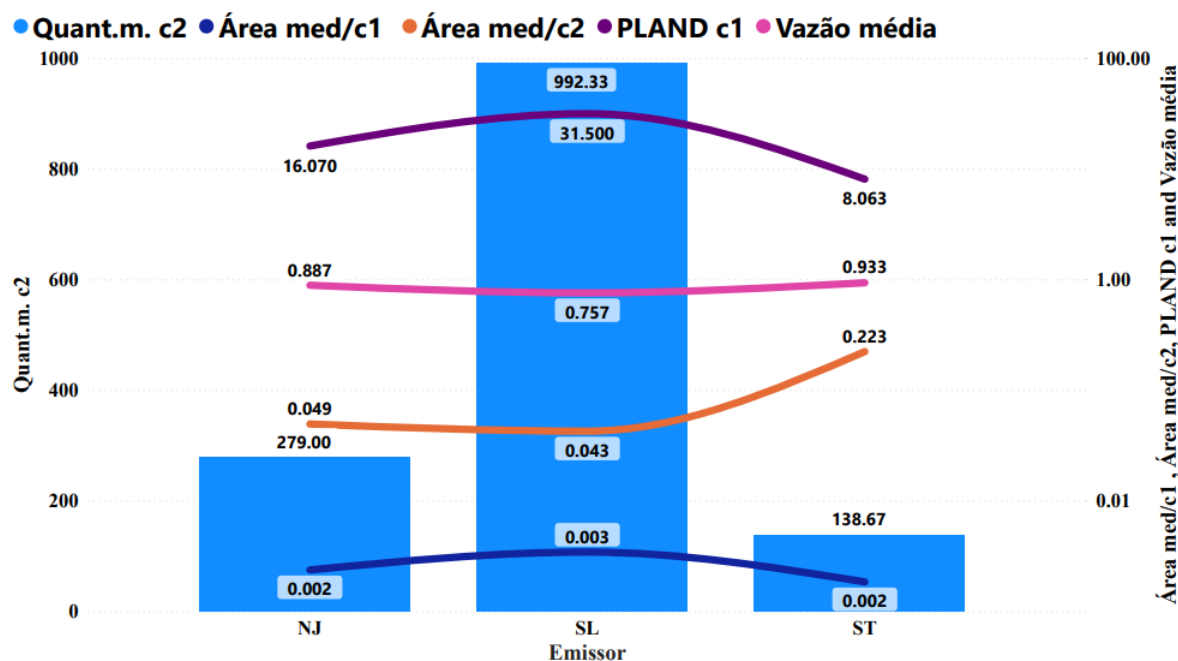
Variáveis	Componente 1	Componente 2	Componente 3
Diluições	-0,29	0,27	-0,74
Emissores	0,14	0,87	0,17
Quantidade de manchas da classe 2	0,98	0,11	-0,05
Área média de manchas da classe 2	-0,13	0,83	-0,13
Área média de manchas da classe 1	0,88	-0,10	0,19
PLAND da classe 1	0,94	-0,03	-0,09
Vazão média dos gotejadores	-0,13	0,16	0,94

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: Método de rotação: Oblimin. Significativo a 5% de probabilidade.

As variáveis quantidade de manchas da classe 2, área média de manchas da classe 1 e PLAND da classe 1 foram as que explicaram de melhor forma a componente 1, ao passo que na componente 2 foram as variáveis emissores e área média de manchas da classe 2 e na componente 3 foram as variáveis diluições e vazão média dos gotejadores.

Na Figura 10 estão apresentados o comportamento da vazão média dos três emissores em função das métricas fractais quantidade de manchas da classe 2, área média das classes 1 e 2 e porcentagem de ocupação da classe 1 (PLAND).



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 10. Comportamento da vazão média dos três emissores em função métricas fractais quantidades de manchas (classe 2), áreas médias (classes 1 e 2) e PLAND classe 1.

No fim dos ensaios experimentais (160 h), a vazão média do emissor SL foi 23,24% menor que a do emissor ST. Por outro lado, no emissor SL produziram-se sete vezes mais manchas da classe 2 do que em ST, mas no emissor SL ocorreu a maior porcentagem de espaços vazios, emissor no qual as áreas médias da classe 2 foram as menores. Por fim, as áreas médias da classe 1 apresentaram valores semelhantes nos três gotejadores.

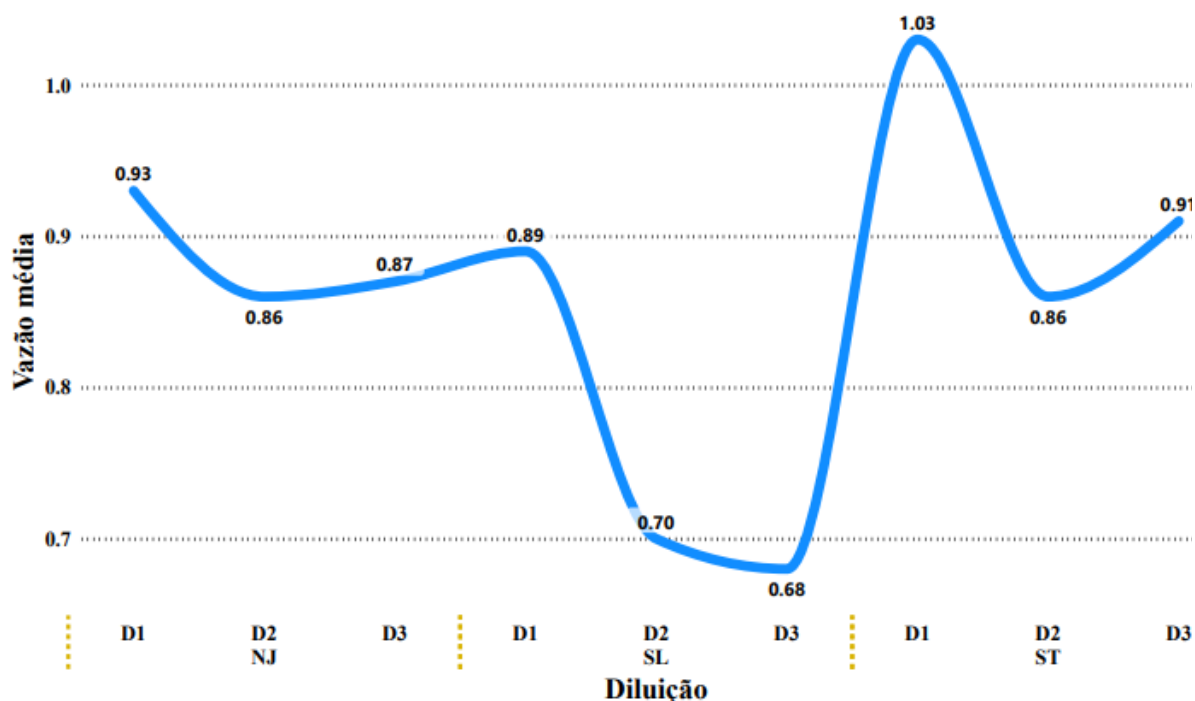
Assim, o efeito de mais manchas da classe 2 e a maior porcentagem de ocupação de espaços vazios em conjunto com áreas médias de partículas pequenas influenciaram no decaimento da vazão.

Provavelmente devido a um incremento no coeficiente de rugosidade da superfície interna do gotejador, somado ao fato de diminuir a largura da passagem do fluxo e, consequentemente, aumentar a velocidade de escoamento, incrementando as perdas por fricção e diminuindo a carga hidráulica e fluxo através do gotejador.

Esta dinâmica da relação da dissipação de energia do fluido dentro do emissor foi estudada por Feng, Wang e Liu (2020), que usaram um modelo cinético e simularam o campo de fluxo dentro de um gotejador. Os referidos autores verificaram que a pressão teve decaimento constante na direção do fluxo de água e a dissipação de energia ocorreu principalmente nos locais de mudança repentina da estrutura do caminho do fluxo.

Al-Amoud, Mattar e Ateia (2014), em seu estudo com parâmetros estruturais de emissores, identificaram que a quantidade das estruturas que compõem o labirinto, como a altura, influenciou no comportamento hidráulico de emissores não autocompensantes.

Na Figura 11, tem-se o comportamento da vazão médias dos tipos de emissores nas diluições de água salobra em água de abastecimento. Notou-se, nessa figura, que a menor suscetibilidade ao entupimento ocorreu na combinação ST-D1, ao passo que os maiores níveis de entupimento foram evidenciados na combinação SL-D3.

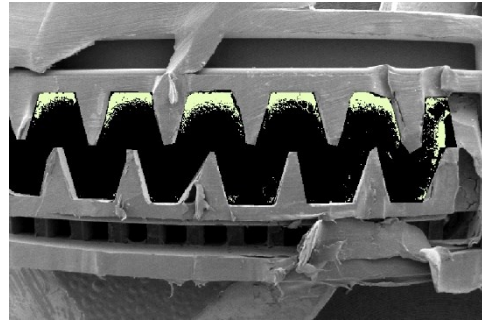
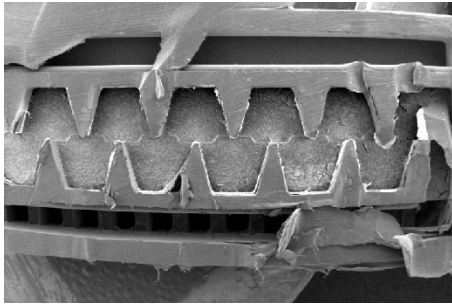
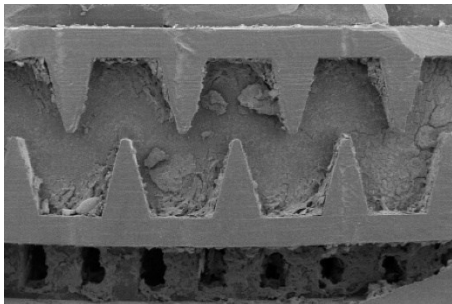


Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 11. Comportamento da vazão média dos tipos de emissores nas diluições de água salobra em água de abastecimento.

São apresentadas, na Figura 12, as imagens por microscopia eletrônica de varredura do emissor ST, abastecido com a diluição D1 com menor nível de obstrução (Figura 12A), e do emissor SL, abastecido com a diluição D3, tendo o maior nível de entupimento (Figura 12B).

Percebeu-se na Figura 12A que a maior quantidade de espaços vazios se concentra na parte superior do labirinto do emissor ST operando com a diluição D1, enquanto os espaços entupidos foram distribuídos de forma mais homogênea na superfície desse tipo de emissor. Na Figura 12 B, percebeu-se que os espaços vazios se espalharam mais ao longo da área do labirinto do emissor SL operando na diluição D3.

A**B**

Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 10. Imagens por microscopia eletrônica de varredura do emissor ST, abastecido com a diluição D1 com menor nível de obstrução (A), e do emissor SL, abastecido com a diluição D3 tendo o maior nível de entupimento (B).

CONCLUSÕES

A combinação ST-D1 resultou nas menores reduções de vazão, ao passo que as maiores redução de vazão ocorreram na combinação SL-D3.

A redução de vazão dos gotejadores foi intensificada a partir de 140 h das unidades gotejadoras devido ao entupimento de origem química.

Com relação à análise de componentes principais, a componente 1 representada somente por métricas fractais (quantidade de manchas da classe 2, área média de manchas da classe 1 e PLAND da classe 1) foi mais importante no processo de explicação da obstrução de gotejadores do que a componente 3, que englobou as variáveis diluições e vazão média dos gotejadores.

O uso conjunto de métricas fractais e microscopia eletrônica de varredura possibilitou mapear a distribuição dos espaços vazios e entupidos no interior dos labirintos dos emissores, indicando que a diluição da água salobra em água de abastecimento influenciou no processo de entupimento.

A diluição de água salobra em água de abastecimento reduziu os níveis de entupimento nos três tipos de gotejadores.

REFERÊNCIAS

- ABOU-SHADY, A.; EL-ARABY, H. Electro-agric, a novel environmental engineering perspective to overcome the global water crisis via marginal water reuse. **Natural Hazards Research**, v. 1, n. 4, p. 202-226, 2021.
- AIT-MOUHEB, N. *et al.* Impact of hydrodynamics on clay particle deposition and biofilm development in a labyrinth-channel dripper. **Irrigation Science**, v. 37, p. 1-10, 2019.
- AMARAL, M. A. C. Matos do *et al.* Dripper clogging by soil particles entering lateral lines directly during irrigation network assembly in the field. **Agricultural Water Management**, v. 273, 107884, 2022.
- AL-AMOUD, A. I.; MATTAR, M. A.; ATEIA, M. I. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v. 12, n. 3, p. 580-593, 2014.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- ARASAN, S.; AKBULUT, S.; HASILOGLU, A. Samet. The relationship between the fractal dimension and shape properties of particles. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 15, p. 1219-1225, 2011.
- ASAD, M. H.; BAIS, A. Weed detection in canola fields using maximum likelihood classification and deep convolutional neural network. **Information Processing in Agriculture**, v. 7, n.4, p. 535-545, 2020.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução GHEYI, H. R. *et al* Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23.ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2017. 1504p.
- BANSAL, Gagan *et al.* A review on materialistic approach to drip irrigation system. **Materials Today: Proceedings**, v. 46, p. 10712-10717, 2021.
- BARRETT, P. J. The shape of rock particles, a critical review. **Sedimentology**, v. 27, n. 3, p. 291-303, 1980.
- BOUNOUA, S. *et al.* Understanding physical clogging in drip irrigation: in situ, in-lab and numerical approaches. **Irrigation Science**, v. 34, n. 4, p. 327-342, 2016.
- BRASIL. Resolução Conama nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília: **DOU**, 18 mar. 2005. Disponível: chrome-extension://efaidnbmninnibpcajpegclclefindmkaj/https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2005/res_conama_357_2005_classificacao_corpos_agua_rtfcd_a_altr_d_res_393_2007_397_2008_410_2009_430_2011.pdf Acesso: 21 maio 2023.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v. 2, n. 2, p. 149-162, 1979.

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 70, n. 4, p. 355-365, 1998.

CERNY, B. A.; KAISER, H. F. A study of a measure of sampling adequacy for factor-analytic correlation matrices. **Multivariate Behavioral Research**, v. 12, n. 1, p. 43-47, 1977.

CLIFF, N. The eigenvalues-greater-than-one rule and the reliability of components. **Psychological Bulletin**, v. 103, n. 2, p. 276, 1988.

COSTA, D. de O. *et al.* Chemical characteristics of soil irrigated with produced water treatment and underground water. **Dyna**, v. 86, n. 210, p. 143-149, 2019.

CUNHA, J. L. de O. *et al.* Monitoramento da bioincrustação em fitas gotejadoras aplicando água com distintas temperaturas e salinidades. **IRRIGA**, v. 25, n. 1, p. 1-13, 2020.

DHAYAL, D. *et al.* Performance of surface and subsurface drip fertigated wheat-moongbean-maize cropping system under different irrigation schedules and nutrient doses. **Agricultural Water Management**, v. 284, 108338, 2023.

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.

ECHEVARRÍA, C. *et al.* Techno-economic assessment of decentralized polishing schemes for municipal water reclamation and reuse in the industrial sector in costal semiarid regions: The case of Barcelona (Spain). **Science of The Total Environment**, v. 815, 152842, 2022.

ESRI ArcGIS. **Release 10**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, v. 437, 438, 2011.

FENG, Ji *et al.* Composite clogging characteristics of emitters in drip irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 37, p. 105-122, 2019.

FENG, J.; WANG, W.; LIU, H. Study on fluid movement characteristics inside the emitter flow path of drip irrigation system using the Yellow River water. **Sustainability**, v. 12, n. 4, 1319, 2020.

FLEMMING, H. C.; NEU, T. R.; WOZNIAK, D. J. The EPS matrix: the “house of biofilm cells”. **Journal of bacteriology**, v. 189, n. 22, p. 7945-7947, 2007.

FU, B. *et al.* Effects of subsurface drip irrigation on alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial community structures in arid and semi-arid areas of northern China. **Applied Soil Ecology**, v. 159, 103859, 2021.

GOODCHILD, M. F. The fractional Brownian process as a terrain simulation model. **Modeling and Simulation**, v. 13, n. 3, p. 1133-1137, 1982.

KATZ, S. *et al.* Fouling formation and chemical control in drip irrigation systems using treated wastewater. **Irrigation Science**, v. 32, p. 459-469, 2014.

KLINKENBERG, B. A review of methods used to determine the fractal dimension of linear features. **Mathematical Geology**, v. 26, p. 23-46, 1994.

LEONEL, L. P.; TONETTI, A. L. Wastewater reuse for crop irrigation: crop yield, soil and human health implications based on giardiasis epidemiology. **Science of the Total Environment**, v. 775, 145833, 2021.

LILI, Z. *et al.* Effects of water salinity on emitter clogging in surface drip irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 39, p. 209-222, 2021.

LI, Q. *et al.* Mechanism of intermittent fluctuated water pressure on emitter clogging substances formation in drip irrigation system utilizing high sediment water. **Agricultural Water Management**, v. 215, p. 16-24, 2019a.

LI, X. *et al.* Design method for chemical clogging emitters boundary optimization. In: LI, Daoliang. (ed). **COMPUTER AND COMPUTING TECHNOLOGIES IN AGRICULTURE**, 10., Dongying, 2016, **Proceedings...** Springer International Publishing, 2019b. p. 318-329.

LI, Y. *et al.* CFD and digital particle tracking to assess flow characteristics in the labyrinth flow path of a drip irrigation emitter. **Irrigation Science**, v. 26, p. 427-438, 2008.

LI, Y. K. *et al.* Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. **Irrigation Science**, v. 30, p. 43-56, 2012.

LIU, Z. *et al.* Application of chelated fertilizers to mitigate organic-inorganic fouling in brackish water drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v. 285, 108355, 2023.

MANDELBROT, B. B. **Fractals: form, change and dimension**. San Francisco: W. H. Freeman, 1977.

MANDELBROT, B. B.; PASSOJA, D. E.; PAULLAY, A. J. Fractal character of fracture surfaces of metals. **Nature**, v. 308, n. 5961, p. 721-722, 1984.

MANDELBROT, B. B. **The fractal geometry of nature**. New York: W. H. Freeman, 1983.

MCKINNEY, W.; TEAM, P. D. Pandas-Powerful python data analysis toolkit. **Pandas: powerful Python data analysis toolkit**, Release 0.7.3. 2012.

MCGARIGAL, K. *et al.* **Spatial pattern analysis program for categorical maps**. URL: www.umass.edu/landeco/research/fragstats/fragstats.html, 2002.

MOHAMMED, A.; ABDULLAH, A. Scanning electron microscopy (SEM): A review. In: **INTERNATIONAL CONFERENCE ON HYDRAULICS AND PNEUMATICS—HERVEX**, 2018, Băile Govora. **Proceedings...** 2018, p. 77-85.

MORSE, D. R. *et al.* Fractal dimension of vegetation and the distribution of arthropod body lengths. **Nature**, v. 314, n. 6013, p. 731-733, 1985.

MUNIZ, G. L. *et al.* Influence of suspended solid particles on calcium carbonate fouling in dripper labyrinths. **Agricultural Water Management**, v. 273, 107890, 2022.

NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. 1991. Water quality in drip/trickle irrigation: a review. **Irrigation science**, v. 12, n. 4, p. 187-192, 1991.

NIU, W.; LIU, L.; CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, v. 31, p. 545-555, 2013.

NGUYEN, M. D. *et al.* Beneficial reuse of water treatment sludge in the context of circular economy. **Environmental Technology & Innovation**, v. 28, 102651, 2022.

OLIVEIRA, F. C. *et al.* Influence of concentration and type of clay particles on dripper clogging. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, v. 6, n. 1, p. 5, 2017.

OLIVEIRA JÚNIOR, R. F. *et al.* Multivariate statistics applied to irrigation water quality data of a watershed in the semiarid region of Brazil. **Revista Caatinga**, v. 34, n. 3 p. 650-58, 2021.

PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. 1. ed. Colombo: Embrapa, 2011.

PETIT, J. *et al.* Methods for drip irrigation clogging detection, analysis and understanding: state of the art and perspectives. **Agricultural Water Management**, v. 272, 107873, 2022.

PINTO, M. F. *et al.* Flow rate dynamics of pressure-compensating drippers under clogging effect. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 21, p. 304-309, 2017.

RIBEIRO, M. D. *et al.* Optical microscopy and SEM for identifying clogging material in a drip irrigation system. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 997-1007, 2018.

RIBEIRO, P. A. de A.; COELHO, R. D.; TEIXEIRA, M. B. Entupimento de tubos gotejadores convencionais com aplicação de cloreto de potássio (branco e vermelho) via duas qualidades de água. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 2, p. 279-287, 2010.

RICHARDS, L. A. **Diagnosis and improvement of saline and alkali soils**. Washington, DC: USDA, 1954. 160 p. (USDA. Agricultural Handbook, 60).

SCHOBBER, P.; BOER, C.; SCHWARTE, L. A. Correlation coefficients: appropriate use and interpretation. **Anesthesia & Analgesia**, v. 126, n. 5, p. 1763-1768, 2018.

SHEN, Y. *et al.* Physical, chemical and biological emitter clogging behaviors in drip irrigation systems using high-sediment loaded water. **Agricultural Water Management**, v. 270, 107738, 2022.

SHI, K. *et al.* A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system. **Agriculture**, v. 12, n. 2, 202, 2022.

SHKLARSKY, E.; LIVNEH, M. The use of gravels for bituminous mixtures. In: THE ASSOCIATION OF ASPHALT PAVING TECHNOLOGISTS, 1964, Washington. **Proceedings...** Washington: NAPA, 1964, v. 33, p. 23-65.

SIYAL, A. W.; GERBENS-LEENES, P. W.; VACA-JIMÉNEZ, S. D. Freshwater competition among agricultural, industrial, and municipal sectors in a water-scarce country. Lessons of Pakistan's fifty-year development of freshwater consumption for other water-scarce countries. **Water Resources and Industry**, v. 29, 100206, 2023.

TAN, J. *et al.* Toward efficient interactions between Python and native libraries. In: PROCEEDINGS OF THE 29TH ACM JOINT MEETING ON EUROPEAN SOFTWARE ENGINEERING CONFERENCE AND SYMPOSIUM ON THE FOUNDATIONS OF SOFTWARE ENGINEERING, 2021, New York. **Proceedings...** New York: ACM, 2021. p. 1117-1128.

TEIXEIRA, A. D. da S. *et al.* Entupimento e modificação da vazão de emissores aplicando diluição de água produzida de petróleo tratada. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 14, n. 4, p. 4128-4140, 2020.

VALE, H. S. M. *et al.* Distribution uniformity in drip units applying dilutions of treated water produced by oil exploration. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 24, p. 394-401, 2020.

VALE, H. S. M. *et al.* Flow rate changes of drippers with dilutions of treated water produced by oil exploration in the Brazilian semiarid region. **Australian Journal of Crop Science**, v. 15, n. 6, p. 796-805, 2021.

VALE, H. S. M. *et al.* Hydraulic performance of drippers applying sanitary landfill leachate diluted in water. **Revista Caatinga**, v. 31, p. 987-996, 2018.

VICINI, L. *et al.* **Técnicas multivariadas exploratórias: teorias e aplicações no software Statistica**. Santa Maria: Ed. UFSM, 2018.

VOULVOULIS, N. Water reuse from a circular economy perspective and potential risks from an unregulated approach. **Current Opinion in Environmental Science & Health**, v. 2, p. 32-45, 2018.

WANG, H. *et al.* Characterization of labyrinth emitter-clogging substances in biogas slurry drip irrigation systems. **Science of The Total Environment**, v. 820, 153315, 2022.

WANG, T. *et al.* Accumulation mechanism of biofilm under different water shear forces along the networked pipelines in a drip irrigation system. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 6960, 2020.

WORONOW, A. Morphometric consistency with the Hausdorff-Besicovich dimension. **Journal of the International Association for Mathematical Geology**, v. 13, p. 201-216, 1981.

YUAN, H. *et al.* Increasing iron use efficiency by controlling emitter clogging in drip irrigation systems. **Agricultural Water Management**, v. 290, 108601, 2023.

YIN, C. Y. *et al.* Desalination characteristics and efficiency of high saline soil leached by brackish water and Yellow River water. **Agricultural Water Management**, v. 263, 107461, 2022.

ZHANG, L. *et al.* Effect of pulsating pressure on labyrinth emitter clogging. **Irrigation Science**, v. 35, p. 267-274, 2017.

ZHANG, L. *et al.* Reclamation effects of distinct volumes and concentrations of CaCl_2 -amended brackish ice in different saline-sodic soils. **Journal of Environmental Management**, v. 337, 117748, 2023.

ZHANG, W. *et al.* Lateral inner environment changes and effects on emitter clogging risk for different irrigation times. **Agricultural Water Management**, v. 233, 106069, 2020.

ZHANGZHONG, L. *et al.* A kinetic model for the chemical clogging of drip irrigation system using saline water. **Agricultural Water Management**, v. 223, 105696, 2019.

ARTIGO 2 - IMPACTO DO USO DE ÁGUA SALOBRA EM UNIDADES GOTEJADORAS: COMPORTAMENTO DO ENTUPIMENTO DOS EMISSORES

RESUMO

A irrigação por gotejamento e o uso agrícola de águas salobras são dois importantes fatores que mitigam a escassez hídrica em regiões semiáridas e a insegurança alimentar. No entanto, a qualidade das águas salobras, associada às pequenas dimensões internas dos gotejadores, potencializa sua obstrução. Assim, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o comportamento do entupimento em três tipos de emissores não autocompensantes aplicando diluições de água salobra. Para isso, foram montadas três bancadas de ensaio em uma área experimental da Universidade Federal Rural do Semi-Árido em Mossoró-RN, Brasil. Nestas, foram instaladas três unidades gotejadoras em esquema de parcelas subsubdivididas, no delineamento inteiramente casualizado com três repetições, tendo nas parcelas as três diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB) (D1 - 100% de AB; D2 - 50% de AB mais 50% de AS; e D3 - 100% de AS); nas subparcelas, os três tipos de gotejadores não autocompensantes (NJ, SL e ST); e nas subsubparcelas, os tempos de avaliação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h). A cada 80 h e 20h de operação das unidades gotejadoras, foram determinadas características físicas e químicas das diluições e os indicadores de obstrução coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e redução de vazão relativa (RVR), respectivamente. Os dados de pH, condutividade elétrica, CUD e RVR foram submetidos à Análise Multivariada de Variância (MANOVA) e teste *post-hoc*. Os resultados obtidos evidenciaram que a combinação SL-D3 proporcionou maior potencial de obstrução, com redução do CUD inicial de 93% para 68%; as combinações menos afetadas pelo entupimento foram SL-D1 e NJ-D2, ambas finalizando os ensaios com CUD de 90%. Com relação ao indicador RVR, as combinações que apresentaram maiores níveis de obstrução (40%) foram ST-D2, SL-D2 e SL-D3 ao fim dos ensaios. A combinação menos afetada por entupimento, com RVR de 25% no final do ensaio, foi SL-D1. O teste *post-hoc* aplicado aos dados mostra variação estatisticamente significativa dos coeficientes CUD e RVR ao longo dos tempos de 0 a 160 h e de 80 a 160 h, não existindo variação estatisticamente significativa de 0 a 80 h. Por fim, a condutividade elétrica não foi influenciada pelo tempo das avaliações, porém houve relação significativa com as diluições.

Palavras chave: Salinidade, Entupimento, Diluição, MANOVA.

ARTICLE 2 - IMPACT OF THE USE OF BRACKY WATER IN DRIPPING UNITS: CLOGGING BEHAVIOR OF EMITTERS

ABSTRACT

Drip irrigation and the agricultural use of brackish water are two important factors that mitigate water scarcity in semi-arid regions and food insecurity. However, the quality of brackish waters associated with the small internal dimensions of the drippers increases their obstruction. Therefore, the objective of this work was to evaluate the clogging behavior in three types of non-self-compensating emitters applying dilutions of brackish water. For this, three test benches were set up in an experimental area at the Universidade Federal Rural do Semi-Árido in Mossoró-RN, Brazil. Three dripping units were installed in these subdivided plots, in a completely randomized design with three replications, having in the plots the three dilutions of brackish water (BW) in supply water (SW) (D1 - 100% of SW; D2 – 50% of SW plus 50% of BW; and D3 - 100% of BW); in the subplots, the three types of non-self-compensating drippers (NJ, SL and ST); and in the subsubplots, the evaluation times (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 and 160 h). Every 80 h and 20 h of operation of the dripping units, the physical and chemical characteristics of the dilutions and the obstruction indicators distribution uniformity coefficient (DUC) and relative flow rate reduction (RFR) were determined, respectively. The pH, electrical conductivity, DUC and RFR data were subjected to Multivariate Analysis of Variance (MANOVA) and *post-hoc* test. The results obtained showed that the SL/D3 combination provided greater potential for obstruction, where there was a reduction of the initial DUC from 93% to 68%; the combinations least affected by clogging were SL-D1 and NJ-D2, both ending the tests with a DUC of 90%. Regarding the RFR indicator, the combinations that showed the highest levels of obstruction (40%) were ST-D2, SL-D2 and SL-D3 at the end of the tests. The combination least affected by clogging, with an RFR of 25% at the end of the test, was SL-D1. The *post-hoc* test applied to the data shows that there was a statistically significant variation in the DUC and RFR coefficients over the periods from 0 to 160 h and from 80 to 160 h, with no statistically significant variation from 0 to 80 h. Finally, electrical conductivity was not influenced by the time of evaluations, but there was a significant relationship with dilutions.

Keywords: Salinity, Clogging, Dilution, MANOVA.

INTRODUÇÃO

A escassez hídrica e os conflitos geopolíticos são dois fatores que explicam a elevação dos preços dos alimentos e, conseqüentemente, o aumento da insegurança alimentar mundial (Abay *et al.*, 2023; FAO, 2020). Ressalta-se também que a agricultura é o setor que mais consome água, sendo responsável por mais de 70% das retiradas globais, que continuam a aumentar (FAO, 2020).

Otimizar o uso da água é uma importante meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, e seis ODS podem ser alcançados com a implementação da irrigação por gotejamento: ODS nº 1 “Acabar com a pobreza em todas as suas formas, em todos os lugares”, ODS nº 2 “Acabar com a fome, alcançar a segurança alimentar e a melhoria da nutrição e promover a agricultura sustentável”, ODS nº 3 “Garantir vidas saudáveis e promover o bem-estar para todos, em todas as idades”, ODS nº 6 “Garantir a disponibilidade e a gestão sustentável da água e do saneamento para todos”, ODS nº 8 “Promover o crescimento inclusivo e sustentável, o emprego pleno e produtivo e o trabalho digno para todos”, ODS nº 12 “Garantir padrões sustentáveis de consumo e produção” (Abdelzaher; Awad, 2022; UN, 2015).

Desse modo, as tecnologias que tornam o uso da água mais eficiente são vistas como um método eficaz para reduzir a utilização de água na irrigação e mitigar a escassez hídrica (Zhou *et al.*, 2021). Nesse sentido, se destaca a irrigação por gotejamento, tecnologia que economiza água devido à sua excelente eficiência de aplicação (Xing *et al.*, 2021). Além disso, a irrigação por gotejamento é considerada uma solução para o conflito hídrico entre as necessidades agrícolas e ecológicas em regiões áridas (Han *et al.*, 2023).

Nos sistemas de irrigação por gotejamento, são utilizados emissores que apresentam baixa vazão e que também operam com baixa pressão, permitindo o uso de motobombas de menor porte e tubulações com menor diâmetro nominal (Lili *et al.*, 2021; Sharu; Ab Razak, 2020).

Neste contexto, o emissor se destaca por ser o principal e mais sensível componente da irrigação por gotejamento devido ao seu caminho de fluxo estreito, dimensionado de 0,5 a 1,2 mm para atender aos requisitos de dissipação de energia (Li *et al.*, 2019). Logo, o desempenho desse dispositivo afeta diretamente a qualidade da aplicação de água pelos sistemas de irrigação por gotejamento (Xu; Zhang, 2020).

A irrigação por gotejamento com uso alternado de água doce e salobra é uma excelente estratégia de irrigação para superar problemas de estresse salino induzidos por água salobra

(Zhang *et al.*, 2022). No entanto, o uso inadequado de água salobra na agricultura leva ao agravamento da salinização do solo (Wang *et al.*, 2023b). Geralmente, os principais íons presentes na água salobra originárias de águas subterrâneas são os cátions Na^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} e os ânions Cl^- e SO_4^{2-} (Yasuor; Yermiyahu; Ben-Gal, 2020).

Mesmo com essas limitações, as águas salobras são utilizadas, ao redor do mundo, na produção de diversas culturas empregando-se sistema de irrigação por gotejamento, tais como algodão (Yuyang *et al.*, 2022) e milho (Zhang *et al.*, 2021) na China; mini melancia (Cova *et al.*, 2021) e amendoim (Silva *et al.*, 2022) no Brasil; girassol (Mahmoud *et al.*, 2019) e tomate, berinjela e pimenta (Soussa, 2010) no Egito; e azeitona (Rohit Katuri; Trifonov; Arye, 2019) e melão (Bustan *et al.*, 2005) em Israel.

Por outro lado, a utilização de água salobra afeta a operação dos sistemas de irrigação por gotejamento devido à formação de incrustações de cálcio e sílica nos caminhos de fluxo dos emissores, tendo sido Ca^{2+} , $\text{CO}_3^{2-} + \text{HCO}_3^-$, pH, dureza total e potencial zeta os principais atributos de qualidade da água que levaram ao entupimento dos emissores (Wang *et al.*, 2023a).

Assim, em outro estudo com água salobra, constatou-se que os carbonatos de cálcio e magnésio foram os principais responsáveis pelo entupimento dos emissores, onde os maiores valores de condutividade elétrica e do tempo de operação acarretaram elevação da incrustação química (Zhangzhong *et al.*, 2019).

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho avaliar o comportamento do entupimento em três tipos de emissores não autocompensantes aplicando diluições de água empregando-se um algoritmo próprio na linguagem python 3.0.

MATERIAL E MÉTODOS

Descrição da área experimental e classificação do clima

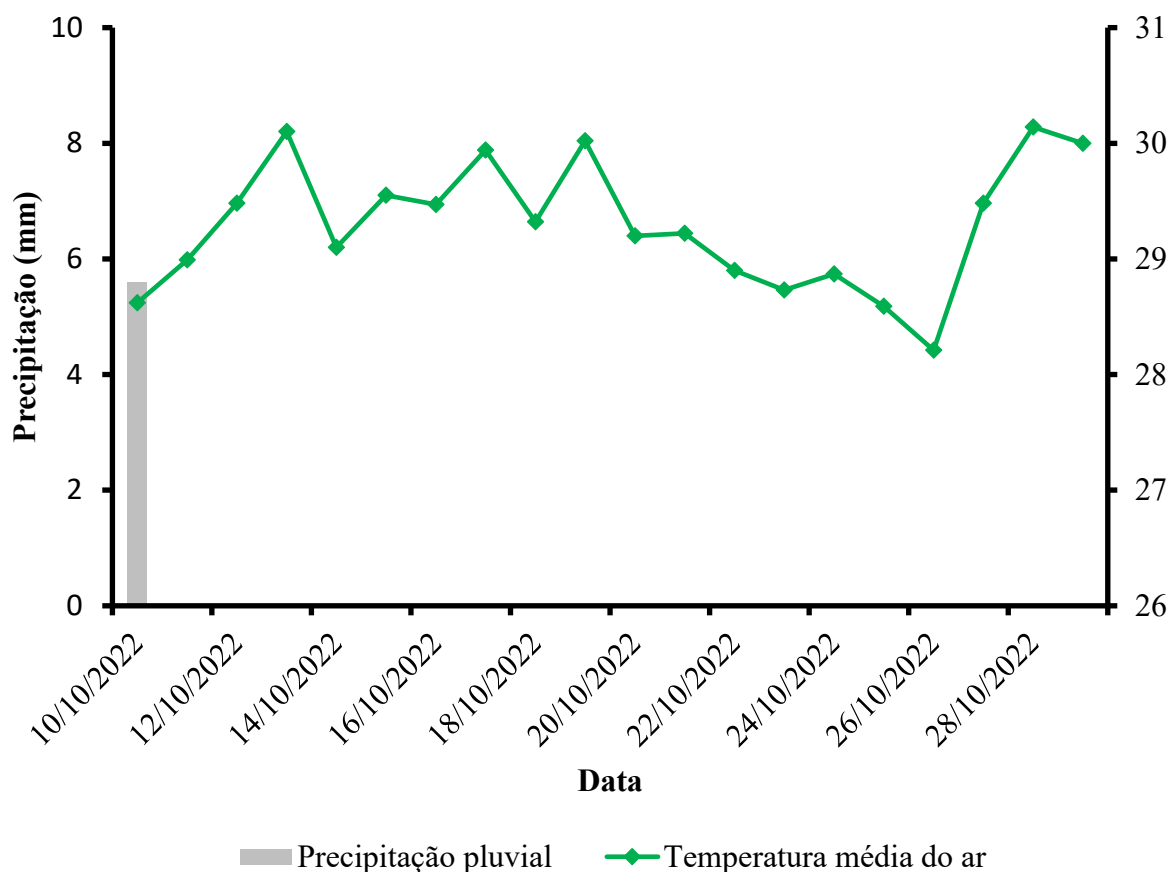
O presente trabalho foi conduzido, no período de 10 a 29 de outubro de 2022, na área experimental de reúso da água situada no Laboratório de Construções Rurais e Ambiente (LCRA) do Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais (DECAM) do Centro de Engenharias (CE), no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN, Brasil ($5^{\circ}12'13,33''\text{S}$ e $37^{\circ}19'26,78''\text{O}$), conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: Autoria Própria (2024), base vetorial NASA (MERRA-2 Model/0,5 x 0,625 deg).

Figura 1. Localização da área experimental do LCRA/UFERSA em Mossoró-RN.

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, a região do estudo apresentou clima tipo BSh (semiárido e quente), com precipitação pluvial média de 794 mm e temperatura média do ar de 26,5°C (Alvares *et al.*, 2013; Dubreuil *et al.*, 2018). Na Figura 2, estão apresentados os valores diários da temperatura média do ar e a precipitação pluvial durante o período de ensaio.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 2. Valores diários da temperatura média do ar e da precipitação pluvial no período experimental.

Tipos e qualidade das águas utilizadas nos ensaios experimentais

No experimento, foram utilizados dois tipos de água: água da rede de abastecimento público, com menor salinidade, e água salobra, tendo maior salinidade. A água de abastecimento foi proveniente da rede pública gerenciada pela Companhia de Águas e Esgoto do Rio Grande do Norte (CAERN), ao passo que a água salobra foi oriunda de um poço artesiano do Setor de Aquicultura da UFERSA.

A água salobra do Setor de Aquicultura foi transportada, semanalmente, até a área experimental de reúso da água do LCRA/UFERSA por meio de um reservatório plástico de 1 m³, conforme ilustrado na Figura 3.



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 3. Captação da água do poço do Setor de Aquicultura da UFERSA campus Mossoró.

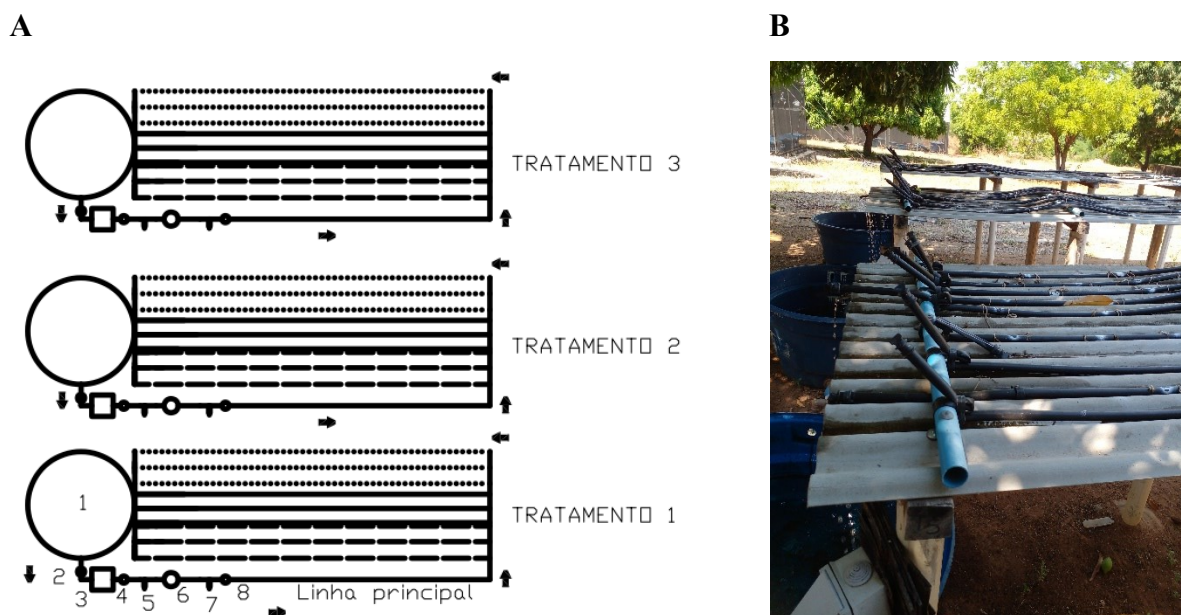
Foram coletadas amostras nos tempos de operação de 0, 80 e 160 h e analisadas os atributos: pH, CE, K^+ , Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , CO_3^{2-} , HCO_3^- , SST, SDT, Dureza e RAS. Nas coletas das amostras e análises, foram utilizadas as recomendações da EMBRAPA (Parron; Muniz; Pereira, 2011) e do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird; Eaton; Rice, 2017). As análises foram realizadas no Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP/UFERSA) e no Laboratório Multiusuário de Análise de Solo, Água e Planta do Semiárido (LASAPSA/UFERSA).

Delineamento experimental e montagem das bancadas experimentais

Este experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado em esquema de parcelas subsubdivididas com três repetições, tendo nas parcelas as três diluições de água salobra (AS) em água de abastecimento (AB) (D1 - 100% de AB; D2 – 50% de AB mais 50% de AS; e D3 - 100% de AS); nas subparcelas, os três tipos de gotejadores não autocompensantes (NJ, SL e ST); e nas subsubparcelas, os tempos de avaliação (0, 20, 40, 60, 80, 100, 120, 140 e 160 h).

Nos ensaios experimentais, foram usadas três bancadas, cada uma tendo área superficial de $8,0 \text{ m}^2$, com 1 m de largura por 8 m de comprimento. Cada bancada foi constituída por um reservatório plástico ($0,31 \text{ m}^3$), um registro de esfera (32 mm), uma motobomba de (0,5 cv),

um filtro de discos (130 μm), dois pontos de coleta de amostras de água, dois manômetros analógicos de glicerina (0 a 400 kPa), uma linha principal (32 mm) com cerca de 10 m de comprimento, uma linha de derivação (50 mm) com aproximadamente 1 m de comprimento e nove linhas laterais (16 mm) com cerca de 8 m de comprimento, sendo três linhas laterais de cada um dos emissores não autocompensantes (Figura 4 e Tabela 1).



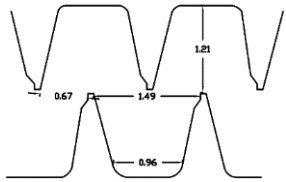
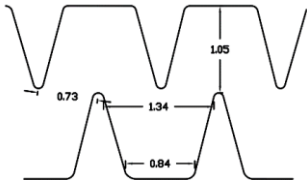
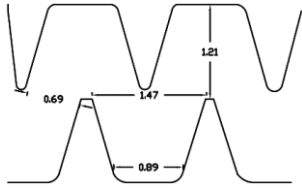
Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 4. Esquema e imagem das três bancadas experimentais (A) destacando: (1) Reservatório plástico de 0,31 m³, (2) Registro de esfera de 32 mm, (3) Motobomba de 0,5 cv, (4) e (8) Manômetros de glicerina (0 a 400 kPa), (6) Filtro de discos de 130 μm , (5) e (7) Pontos para coleta de amostras de água, linhas de irrigação com emissores StreamLine, Super Typhoon e NaanDanJain; e imagem lateral da extremidade final de uma das bancadas (B).

A Tabela 1 apresenta as características hidráulicas, dimensões e imagens dos emissores e seus respectivos labirintos utilizados nos ensaios experimentais com diluições de AS em AB. Nota-se que os emissores ST e NJ possuem maior dimensão no sentido ortogonal à passagem do fluxo (1,21mm) em relação ao emissor SL (1,05mm); semelhantemente, os gotejadores ST e NJ apresentam maior separação na parede inferior do labirinto, 0,89 e 0,96 mm, respectivamente; por sua vez, o emissor SL apresenta dimensão de 0,84mm.

Tabela 1. Características e imagens dos emissores utilizados nos ensaios experimentais.

Emissores	Vazão nominal ⁽¹⁾	K ⁽¹⁾	x ⁽¹⁾	Espaçamento entre emissores ⁽¹⁾
	(L h ⁻¹)	(adimensional)	(adimensional)	(m)
NJ	1,70	0,56	0,46	0,20
SL	1,60	0,57	0,45	0,30
ST	1,60	0,53	0,48	0,30

Emissores	Dimensões do labirinto ⁽²⁾	Imagem dos emissores ⁽¹⁾
	Mm	
NJ		
SL		
ST		

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: K – Coeficiente de descarga do emissor; x – Expoente da taxa de fluxo do emissor⁽¹⁾ Informações obtida dos catálogos dos fabricantes. ⁽²⁾ Medições usando base vetorial obtida por microscopia eletrônica de varredura no Centro de Pesquisa em Ciências Vegetais do Semi-Árido (CPVSA) da UFRSA empregando-se uma câmera Olympus DP72 acoplada a um microscópio óptico da marca Olympus BX51.

Avaliação do desempenho dos emissores

Nas linhas laterais das unidades gotejadores que aplicaram diluições de As em AB, foram marcados 16 emissores, nos quais se efetuou a medição da vazão, a cada 20 h durante 160 h de operação das bancadas experimentais, que corresponde a um ciclo do cultivo do melão no semiárido Potiguar e com uma pressão de trabalho de 80 kPa usada na região, obtendo-se nove momentos de avaliação da vazão por tipo de gotejador.

A vazão foi obtida por meio da razão entre o volume de água aplicado pelo emissor, em L, e o tempo de ensaio de 0,05 h.

Os critérios utilizados para avaliação do entupimento do emissor foram o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) proposto por Keller e Karmeli (1975) e a redução da vazão

relativa (RVR) proposta por Liu e Huang (2009), ambos em percentual e representados pelas equações 1 e 2, respectivamente.

$$CUD = 100 \cdot \frac{q_{1/4}}{\bar{q}} \quad (1)$$

$$RVR = 100 \cdot \left(\frac{q_i - q_a}{q_i} \right) \quad (2)$$

Em que:

CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

$q_{1/4}$ - Valor médio dos 25% menores valores de vazão dos emissores; e

$\bar{q}$ - Vazão média dos emissores, L h⁻¹.

RVR - Redução da vazão relativa, %;

q_i - Vazão inicial, L h⁻¹; e

q_a - Vazão atual, L h⁻¹.

Em relação ao CUD, Merriam e Keller (1978) propuseram a seguinte classificação: CUD < 70% representa classificação ruim; 70 ≤ CUD ≤ 80 apresenta a qualificação regular; 80 ≤ CUD ≤ 90 recebe a classificação bom; por fim, CUD > 90% é qualificado como excelente. Valores de RVR maiores que 0 indicam redução de vazão dos emissores, ao passo que valores de RVR menores que 0 expressam aumento da vazão (Mesquita *et al.*, 2016).

Análise estatística

Nas análises estatísticas, foram utilizadas as seguintes variáveis: tempos, emissores, diluições, vazão (Q) dos gotejadores, coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), redução da vazão relativa (RVR), pH e condutividade elétrica (CE). As análises estatísticas compreenderam a obtenção da matriz de correlação de Pearson, análise multivariada da variância (MANOVA) e o teste *post-hoc* empregando-se o pacote de análises estatísticas da linguagem de programação Python (versão 3.0).

Esta análise estatística foi iniciada com a obtenção da matriz de correlação de Pearson, em que os valores de r de -1 e +1 representaram maior correlação, e aqueles valores próximos de zero estão relacionados à ausência de correlação (Oliveira Júnior *et al.*, 2021). Utilizou-se

na interpretação dos valores de r a classificação proposta por Schober, Boer e Schwarte (2018):

1) Insignificante para $0,00 \leq r < 0,10$; 2) Correlação fraca para $0,10 \leq r \leq 0,39$; 3) Correlação moderada para $0,40 \leq r \leq 0,69$; 4) Correlação forte para $0,70 \leq r \leq 0,89$; e 5) Correlação forte para $0,90 \leq r \leq 1,00$.

A MANOVA é um tipo de análise de variância (ANOVA) que possui duas ou mais variáveis dependentes. A alternativa de usar MANOVA é realizar ANOVA para cada variável dependente, porém isto incrementa probabilidade de cometer o erro tipo I e várias ANOVAS não podem determinar se existe relação entre as variáveis independentes (Warne, 2014).

Por outro lado, procedimentos tipo *post-hoc* são geralmente usados depois da rejeição da hipótese nula em uma análise de MANOVA, procedimento que explica o motivo da rejeição da hipótese nula, pois gera um conjunto de equações lineares não autocorrelacionadas, as quais modelam as diferenças entre os grupos de variáveis (Stevens, 2009). No presente estudo, as variáveis dependentes pH e CE apresentaram as maiores significâncias estatísticas entre as variáveis de qualidade da água, razão pela qual foram usadas nas análises de MANOVA e *post-hoc*.

Na MANOVA, o modelo utilizado incluiu as variáveis dependentes CE, pH, RVR e CUD, para os três tipos de diluições, e a variável independente foi representada pelo tempo em horas (Anexo B). Posteriormente, foi realizado teste *post-hoc* (Anexo C) para aferir se houve diferença significativa entre os grupos e determinar onde elas estão.

A grande maioria dos *softwares* estatísticos produz os seguintes testes: Lambda de Wilk; Traço de Pillai; Traço Hotelling-Lawley e a Raiz máxima de Roy. O primeiro teste, que se baseia nas estimativas clássicas da teoria normal de dispersões generalizadas, é extremamente sensível à influência de *outliers*, sendo usado para testar se existem diferenças entre as médias de grupos identificados de sujeitos em uma combinação de variáveis dependentes.

O traço de Pillai foi usado neste estudo e pode ser interpretado como a proporção da variância nas variáveis dependentes, explicada pela variação das variáveis independentes. Por sua vez, o Traço Hotelling-Lawle é a estatística usada para um teste multivariado de diferenças médias entre dois grupos. Finalmente, a Raiz máxima de Roy, apesar de sua robustez, provisão de aproximações precisas e tratáveis para sua distribuição sob a alternativa tem sido um problema aberto de longa data (Johnstone; Nadler, 2017; Şeyma *et al.*, 2019; Todorov; Filzmoser, 2010).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Qualidade físico-química das diluições de água salobra em água de abastecimento

Na Tabela 2, estão apresentadas as características físico-químicas das diluições de água salobras (AS) em água de abastecimentos (AB) nos tempos de operação das bancadas de 0, 80 e 160 h.

Tabela 2. Características físico-químicas das diluições de salobra (AS) em água de abastecimento (AB) utilizadas nas unidades gotejadoras.

Tempo versus diluição	pH	CE dSm ⁻¹	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	CO ₃ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SST	SDT mg L ⁻¹	Dur	RAS (mmol _e L ⁻¹) ^{0,5}
0hD1	8,40	0,60	0,30	5,80	0,90	0,50	2,40	0,60	3,90	0	85	70	6,90
0hD2	8,30	3,50	0,60	19,90	12,80	12,80	26,00	0,60	4,70	4	456	1280	5,60
0hD3	8,10	5,50	0,80	29,00	19,30	20,60	37,60	0,60	5,60	28	837	1995	6,50
80hD1	9,10	0,50	0,30	4,30	0,60	1,00	3,40	0,40	2,30	0	96	80	4,80
80hD2	8,80	3,40	0,90	22,90	13,60	18,80	36,00	0,60	2,80	4	1121	1620	5,70
80hD3	8,90	5,00	1,20	35,30	21,10	28,60	56,00	1,00	3,20	28	1747	2485	7,10
160hD1	8,10	0,60	0,60	5,50	0,60	0,60	2,70	0,50	3,10	2	108	57	7,30
160hD2	8,00	4,30	4,30	19,90	15,40	16,80	27,20	0,40	3,60	26	1199	1610	5,00
160hD3	7,90	5,20	5,20	32,40	33,00	27,30	57,00	0,80	4,20	50	4475	3015	5,90

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: CE – Condutividade elétrica; SST – Sólidos suspensos totais; SDT – Sólidos dissolvidos totais; Dur – Dureza; RAS – Razão de adsorção de sódio; D1 - 100% de AB mais 0% de AS; D2 – 50% de AB mais 50% de AS e 0% de AA mais 100% de AS.

Os valores de pH das diluições, ao longo do tempo, variaram de 7,90 a 9,10, de forma que, segundo Bucks, Nakayama e Gilbert (1979), as três diluições representam risco severo (pH > 7,50) de obstrução de gotejadores, devido à formação de precipitados de carbonato de cálcio (Zhangzhong *et al.*, 2019).

Com relação a CE, tem-se oscilação de 0,5 a 5,5 dS m⁻¹ nas diluições, onde os menores valores ocorrem na diluição D1 (0,50 a 0,60 dS m⁻¹). Portanto, ao empregar o critério de Capra e Sciclone (1998), verificou-se que o risco de obstrução de gotejadores aumentou com o incremento da salinidade, sendo baixo para CE < 1,0 dS m⁻¹, moderado para 1 dS m⁻¹ ≤ CE ≤ 4,5 dS m⁻¹ e severo para CE > 4,5 dS m⁻¹.

Os teores do íon K⁺ oscilaram de 0,30 a 5,20 mmol_e L⁻¹ nas três diluições, ao longo do tempo. No trabalho de Guan *et al.* (2018), verificou-se que concentrações de sulfato de potássio acima de 10 g L⁻¹ potencializaram a obstrução de gotejadores, devido à elevação da CE e da formação de precipitados.

Nas três diluições, as concentrações de Na^+ e de Cl^- variaram de 4,30 a 35,30 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$ e de 2,40 a 57,00 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$, respectivamente, razão pela qual se deve ressaltar que o cloreto de sódio e Na^+ estão presentes entre os constituintes químicos nas obstruções de gotejadores abastecidos com água salina (Lili *et al.*, 2016).

Os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} oscilaram nas três diluições, ao longo do tempo, de 0,60 a 33,00 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$ e de 0,50 a 28,60 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$, respectivamente. Segundo Capra e Sciclone (1998), no atributo Ca^{2+} o risco de obstrução de gotejadores foi baixo ($\text{Ca}^{2+} < 12,50 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$) na diluição D1, ao passo que nas diluições D2 e D3 o risco de entupimento foi moderado ($12,50 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1} \leq \text{Ca}^{2+} \leq 22,50 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$), exceto em D3 às 160 h, que teve risco de obstrução severo ($\text{Ca}^{2+} > 22,50 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$). Em relação ao Mg^{2+} , o risco de entupimento foi baixo na diluição D1 ($\text{Mg}^{2+} < 2,00 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$) e severo nas diluições D2 e D3 ($\text{Mg}^{2+} > 7,30 \text{ mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$), pelo critério de Capra e Sciclone (1998).

Nesse sentido, informação importante é encontrada no trabalho de Lili *et al.* (2016), onde o principal material que levou ao entupimento químico de gotejadores aplicando água salina foi a precipitação de CaCO_3 .

Os altos teores dos atributos K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} influenciaram na criação de material de entupimento no interior dos emissores (Ayers; Westcot, 1999).

Nas três diluições, as concentrações de carbonato (CO_3^{2-}) e bicarbonatos (HCO_3^-) foram de 0,40 a 1,00 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$ e de 2,30 a 5,60 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$, respectivamente. Com relação ao CO_3^{2-} , os valores estão de dentro da faixa de 0 a 1 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$, proposta por Ayers e Westcot (1999) como usual para água de irrigação, ressaltando que elevadas temperaturas e altos valores de pH podem acarretar a formação de precipitados de carbonato. Os referidos autores ainda afirmaram que concentrações de HCO_3^- superiores a 5,0 $\text{mmol}_\text{c} \text{L}^{-1}$ acarretam problemas de obstrução severa, principalmente quando o valor do pH da água de irrigação é elevado.

Nesse contexto, Zhou *et al.* (2018) relataram que o carbonato foi o principal precipitado químico formado no sistema de irrigação por gotejamento durante o processo de entupimento, ao passo que os outros componentes minerais foram transportados principalmente da fonte de água.

Os valores dos atributos SST e SDT oscilaram de 0 a 50 mg L^{-1} e de 85,00 a 4475 mg L^{-1} , respectivamente. Pela classificação de Bucks, Nakayama e Gilbert (1979), os riscos de obstrução do atributo SST foram baixos ($\text{SST} < 50 \text{ mg L}^{-1}$), exceto em D3 às 160 h, com risco de obstrução moderado ($50 \text{ mg L}^{-1} \leq \text{SST} \leq 100 \text{ mg L}^{-1}$).

Porém, o atributo SDT apresentou comportamento diferente: na diluição D1, o risco de obstrução foi baixo ($\text{SDT} < 500 \text{ mg L}^{-1}$); na diluição D2, foi baixo e moderado ($500 \text{ mg L}^{-1} \leq$

$SDT \leq 2000 \text{ mg L}^{-1}$); e na diluição D3, foi moderado e severo ($SDT > 2000 \text{ mg L}^{-1}$), empregando-se a classificação de Bucks, Nakayama e Gilbert (1979).

Os teores de dureza oscilaram de 57 a 3015 mg L^{-1} nas três diluições, ao longo do período experimental, e segundo Mirzaee, Zakerinia e Farasati (2021), a água com valores de dureza superiores a 300 mg L^{-1} é classificada como água muito dura, com risco de sedimentação de partículas dentro dos gotejadores, em virtude do aumento da temperatura e da alcalinidade.

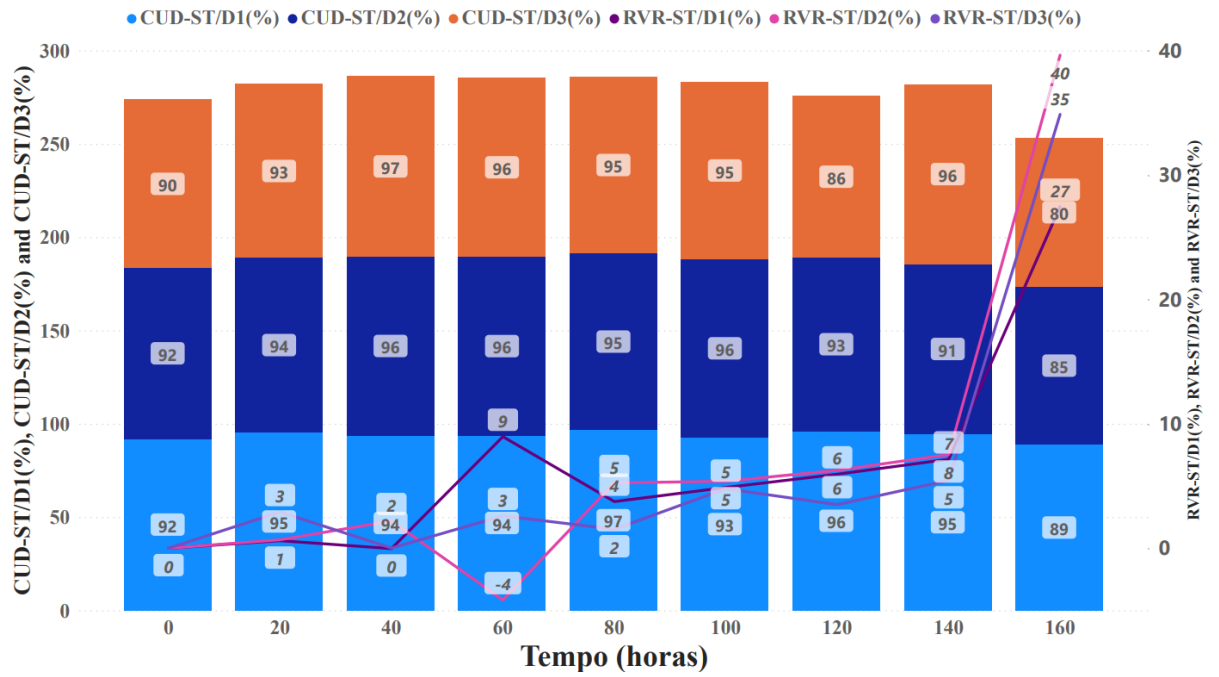
A razão de adsorção de sódio (RAS) oscilou de 4,8 a 7,3 ($\text{mmol}_c \text{ L}^{-1}$)^{0,5} nas diluições nos tempos de operação de 0, 80 e 160 h. No que se refere à avaliação dos riscos de entupimento de gotejadores com base nos atributos de qualidade da água, a RAS é um indicador essencial devido aos efeitos dos sedimentos carbonáticos em condições alcalinas (Mirzaee; Zakerinia; Farasati, 2021).

Quando a água subterrânea é bombeada para a superfície e aplicada no solo por meio de um sistema de irrigação localizada, a temperatura, a pressão e o pH dessa água geralmente mudam, o que pode ter ocorrido no presente estudo. Logo, isso pode resultar na precipitação de carbonatos de cálcio ou outros minerais para formar incrustante nas superfícies internas dos componentes do sistema de irrigação, entupindo o interior dos labirintos dos gotejadores, risco que se torna maior quando a temperatura da água for elevada e quando o pH for superior a 8,0 (Pitts *et al.*, 1990; Rugebregt *et al.*, 2023; Patty, 2013).

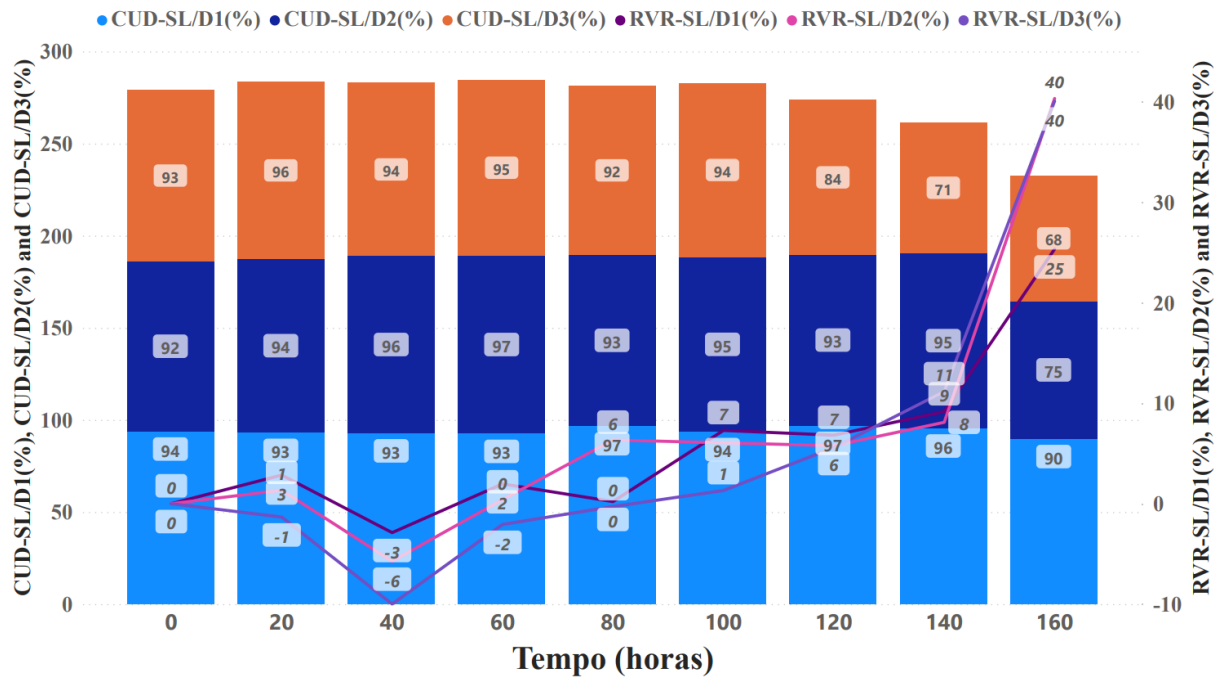
Ocorrência de entupimento químico em gotejadores aplicando diluições de água salobra

A Figura 5 apresenta o comportamento dos coeficientes de detecção de entupimento RVR e CUD para os emissores ST, SL e NJ aplicando diluições de água salobra e em água de abastecimento durante 160 h.

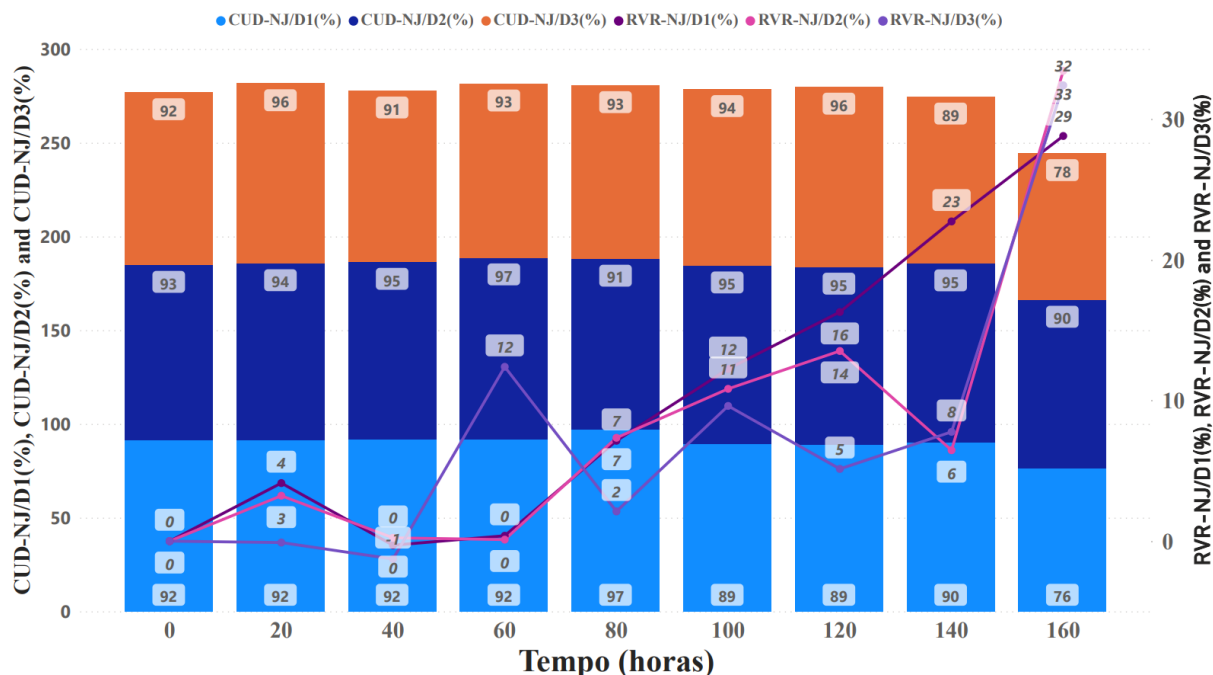
Na Figura 5A, observou-se que os valores do CUD para o emissor ST são classificados como excelentes das 0 h às 100 h nas três diluições estudadas. Às 120 h, o CUD das diluições D1 e D2 permaneceu excelente, ao passo que para D3 o CUD foi consideravelmente reduzido, sendo classificado como bom. Às 140 h, o CUD novamente foi excelente para as três diluições e bom nas três diluições às 160 h. Por sua vez, os valores de RVR ficaram na faixa de 0 a 40%, ao longo do período experimental.



B



C



Fonte: Autoria Própria (2024).

Figura 5. Comportamento dos coeficientes de detecção de entupimento RVR e CUD para os emissores ST (A), SL (B) e NJ (C) operando nas diluições de água salobra e em água de abastecimento durante 160 h.

Na Figura 5B, apresentam-se os resultados do emissor SL, onde de 0 h às 100 h os valores de CUD foram excelentes nas três diluições. Às 120 e 140 h, houve excelente valor de CUD nas diluições D1 e D2, e para D3 os valores de CUD foram classificados como bom e regular, respectivamente.

Por fim, às 160 h, o valor do CUD foi excelente em D1, regular em D2 e ruim em D3. Com relação ao RVR, predominou o processo de redução de vazão, ao longo do período experimental; tanto na diluição D2 quanto na D3, ocorreram os maiores valores de RVR (40%), ao passo que na diluição D1 houve o menor RVR (25%).

Evidenciaram-se às 40 h valores negativos de RVR, indicando processos de aumento da vazão. A variação da vazão ao longo tempo evidencia os processos de entupimento e desentupimento ocorridos nos sistemas de irrigação por gotejamento, ocasionados por diferentes motivos, como alterações na pressão de trabalho, mudanças na qualidade de água, aumento da temperatura, movimentação das linhas laterais no momento da avaliação, dentre outras causas.

Na Figura 5C, notou-se que o emissor NJ manteve valores do CUD classificados como excelentes até 80 h nas três diluições. Das 100 às 120 h, esse emissor apresentou valores

excelentes de CUD nas diluições D2 e D3 e valores de CUD classificados como bons na diluição D1.

Às 140 h, as diluições D1 e D2 apresentam valores de CUD excelentes, mas na diluição D3 o valor foi classificado como bom. Finalmente, às 160 h, D2 teve excelente valor de CUD, ao passo que em D1 e D3 o valor do CUD foi regular. Em relação ao coeficiente RVR, a faixa de valores variou de 0% a 33%, entre 0 h e 40 h, havendo comportamento dos resultados muito semelhante. Nas diluições D2 e D3, houve as maiores variações, ao passo que D1 apresentou comportamento mais estável ao longo do tempo.

Os valores de CUD e RVR obtidos por Zhangzhong *et al.* (2021) mostraram tendência de queda lenta e acentuada sob condições de água salina. Os valores de CUD ficaram na faixa de 85 a 90% ao longo de 168 h de operação do sistema e com uma CE de $6,0 \text{ dS m}^{-1}$ e um RVR de 30 a 50% para as mesmas condições.

Em outro estudo, sistemas de irrigação por gotejamento que operaram por 700 h com água residuária apresentaram valores de CUD de 70% e 10% às 400 h e 700 h, respectivamente, ou seja, houve tendência de redução do CUD ao longo do tempo, ao passo que os resultados de RVR apresentaram tendência de aumento dos valores para todos os tipos de emissores ensaiados (Yunkai *et al.*, 2015).

A combinação SL-D3 resultou na maior suscetibilidade ao entupimento, passando de um CUD inicial de 93% para 68%, tendo sido esse o tipo de gotejador dentre os testados no presente estudo que apresentou as menores dimensões internas de seu labirinto. As combinações menos suscetíveis ao entupimento, tendo maiores valores de CUD ao fim do experimento, foram NJ-D2 (90%), SL-D1 (90%) e ST-D1 (89%).

Com relação ao RVR, as maiores suscetibilidades ao entupimento ocorreram nas combinações ST-D2, SL-D2 e ST-D3, apresentando no fim dos ensaios valor de 40%. Por outro lado, a combinação SL-D1 foi a menos suscetível ao entupimento e teve RVR de 25%.

Estas variações de CUD e RVR derivam dos processos de entupimento, devido à aplicação de águas com qualidade inferior pelos gotejadores, sendo o $\text{pH} > 8,0$ e os teores de HCO_3^- maiores de 5 mmol L^{-1} , atributos da qualidade de água que aumentam a probabilidade de entupimento químico (Shi *et al.*, 2022).

Os valores de CE na diluição D3 maiores que $4,5 \text{ dSm}^{-1}$ podem ter influenciado na formação de incrustações dentro dos labirintos, consequentemente alterando os valores de CUD e RVR. Outros atributos de qualidade que influenciaram no entupimento de emissores foram o Ca^{2+} , Mg^{2+} e SDT.

Análise multivariada da variância (MANOVA) e o teste *post-hoc*

A Tabela 3 apresenta os valores de entrada para gerar os resultados da MANOVA, sendo as variáveis independentes os tempos, emissores e diluições. Por sua vez, as variáveis dependentes foram: vazão média (Q) dos gotejadores, CUD e RVR. Observou-se às 0 h que o emissor ST-D2 iniciou com a maior vazão média, ao passo que SL-D3 teve a menor vazão, sendo que o emissor ST tem as maiores dimensões internas do labirinto e SL as menores.

Tabela 3. Dados de entrada para MANOVA.

Tempos	Emissores	Diluições	Q	CUD	RVR	pH	CE
0	SL	D 1	1,19	93,92	0,00	8,44	0,59
0	NJ	D 1	1,3	91,58	0,00	8,44	0,59
0	ST	D 1	1,42	92,03	0,00	8,44	0,59
0	SL	D 2	1,17	92,2	0,00	8,26	3,53
0	NJ	D 2	1,29	93,12	0,00	8,26	3,53
0	ST	D 2	1,43	91,54	0,00	8,26	3,53
0	SL	D 3	1,13	93,08	0,00	8,1	5,49
0	NJ	D 3	1,28	92,09	0,00	8,1	5,49
0	ST	D 3	1,4	90,11	0,00	8,1	5,49
80	SL	D 1	1,18	96,79	0,21	9,1	0,48
80	NJ	D 1	1,21	97,24	7,14	9,1	0,48
80	ST	D 1	1,37	96,71	3,75	9,1	0,48
80	SL	D 2	1,09	92,87	6,34	8,8	3,38
80	NJ	D 2	1,2	90,76	7,35	8,8	3,38
80	ST	D 2	1,35	94,74	5,25	8,8	3,38
80	SL	D 3	1,13	91,68	-0,29	8,9	4,95
80	NJ	D 3	1,25	92,58	2,12	8,9	4,95
80	ST	D 3	1,38	94,51	1,52	8,9	4,95
160	SL	D 1	0,89	89,83	25,34	8,1	0,63
160	NJ	D 1	0,93	76,29	28,82	8,1	0,63
160	ST	D 1	1,03	88,89	27,46	8,1	0,63
160	SL	D 2	0,7	74,69	40,33	7,99	4,31
160	NJ	D 2	0,86	89,79	33,46	7,99	4,31
160	ST	D 2	0,86	84,6	39,64	7,99	4,31
160	SL	D 3	0,68	68,15	40,07	7,88	5,20
160	NJ	D 3	0,87	78,23	32,42	7,88	5,20
160	ST	D 3	0,91	79,85	34,88	7,88	5,20

Fonte: Autoria Própria (2024).

No fim do experimento (160 h), foi ST-D3 que finalizou com a maior vazão e SL-D3 obteve o menor valor. Em relação ao CUD, no início do experimento foi SL-D1 que obteve o

maior valor e ST-D3, o menor valor. No fim do experimento, SL-D3 apresentou o menor valor e o maior valor foi para NJ-D2.

A variável RVR foi 0 para todos os gotejadores no início do experimento e o maior valor no fim da pesquisa foi SL-D2. Em relação ao pH, observou-se tendência a diminuir em relação ao tempo, e a salinidade teve variação em virtude da diluição.

Na Tabela 4, apresenta-se a matriz de correlação de Pearson das variáveis tempo, emissores, diluições, vazão, CUD, RVR, pH e CE. Evidenciou-se nessa tabela que existem seis correlações iguais ou superiores 0,70 (Vicini *et al.*, 2018), classificadas como forte a muito forte, pelo critério de Schober, Boer e Schwarte (2018).

Tabela 4. Matriz de correlação de Pearson das variáveis tempo, emissores, diluições, vazão, CUD, RVR, pH e CE.

Variáveis	Tempos	Emissores	Diluições	Q	CUD	RVR	pH	CE
Tempos	1							
Emissores	0	1						
Diluições	0,00	0,00	1					
Q	-0,81	0,41	-0,10	1				
CUD	-0,62	0,12	-0,27	0,79	1			
RVR	0,89	0,00	0,05	-0,90	-0,82	1		
pH	-0,27	0,00	-0,25	0,58	0,69	-0,63	1	
CE	0,05	0,01	0,97	-0,18	-0,31	0,15	-0,34	1

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: Q – Vazão dos gotejadores; CUD – Coeficiente de uniformidade de distribuição; RVR – Redução de vazão relativa; e CE – Condutividade elétrica.

Notou-se que a correlação entre as variáveis tempos e Q foi forte negativa (-0,81), ou seja, quando o tempo aumenta o valor de Q diminui, em virtude da obstrução dos gotejadores. Com relação às variáveis tempos e RVR, a correlação foi forte positiva (0,89), indicando que com o passar do tempo o valor do RVR aumenta, também em virtude do surgimento do entupimento dos gotejadores que propiciam redução da vazão.

A correlação foi muito forte positiva (0,97) entre as variáveis diluições e CE, pois o aumento na proporção de água salobra nas diluições em água de abastecimento aumenta a salinidade e, consequentemente, a CE.

Observou-se que a correlação entre as variáveis Q e CUD foi forte positiva (0,79), tendo ocorrido valores elevados de CUD sem a redução dos valores de Q em virtude do entupimento dos gotejadores. Entretanto, a correlação entre as variáveis Q e RVR foi muito forte positiva (0,90), pois aumento do RVR em detrimento do entupimento acarreta redução de Q.

Por fim, houve correlação forte negativa (-0,82) entre as variáveis CUD e RVR, indicando que redução do valor do CUD propicia aumento do RVR pelo entupimento dos emissores.

Na Tabela 5, estão apresentados os resultados da análise multivariada de variância (MANOVA) por meio dos testes Lambda de Wilk, Traço de Pillai, Traço Hotelling-Lawley e Raiz máxima de Roy.

Tabela 5. Análise multivariada de variância (MANOVA) destacando os resultados dos testes Lambda de Wilk, Traço de Pillai, Traço Hotelling-Lawley e Raiz máxima de Roy.

Variável dependente	Variável independente	Testes	Valor	Num GL	Den GL	F Valor	Pr > F
pH + CE + CUD + RVR	Tempos	Lambda de Wilks	0,00	8,00	42,00	138,34	0,0000***
		Traço de Pillai	1,90	8,00	44,00	103,61	0,0000***
		Traço Hotelling-Lawley	73,41	8,00	27,78	187,87	0,0000***
		Raiz máxima de Roy	62,66	4,00	22,00	344,61	0,0000***
	Diluições	Lambda de Wilks	0,01	8,00	42,00	46,36	0,0000***
		Traço de Pillai	1,07	8,00	44,00	6,35	0,0000***
		Traço Hotelling-Lawley	87,68	8,00	27,78	224,41	0,0000***
		Raiz máxima de Roy	87,59	4,00	22,00	481,76	0,0000***
	Emissores	Lambda de Wilks	0,94	8,00	42,00	0,17	0,9939
		Traço de Pillai	0,06	8,00	44,00	0,17	0,9933
		Traço Hotelling-Lawley	0,07	8,00	27,78	0,17	0,9936
		Raiz máxima de Roy	0,07	4,00	22,00	0,36	0,8346

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: GL – Grau de liberdade; ** Significativo a 0,1% de probabilidade.

O teste Traço de Pillai é significativo (Traço de Pillai = 1,90, $F(8, 44) = 103,61$, $p < 0,001$), indicando diferenças estatísticas nas variações dos níveis alcançados para as variáveis dependentes pH, CE, CUD e RVR em relação à variável independente tempos de avaliação.

De forma similar, quando contrastadas as mesmas variáveis dependentes com a variável independente diluições, o teste supracitado também foi significativo (Traço de Pillai = 1,072, $F(8,$

44), $p < 0,001$), representando, assim, uma associação estatisticamente significativa entre as diluições, que representam níveis de salinidade, com as variáveis CUD, RVR, CE e pH.

Finalmente, quando exploradas as variáveis dependentes com a variável independente emissor, o teste foi não significativo (Pillai's Trace = 0,06, $F(8, 44) = 0,17$, $p > 0,001$), ou seja, não existe diferença estatística entre os tipos de emissores com as variáveis dependentes analisadas.

A Tabela 6 explica se houve variação estatisticamente significativa das variáveis dependentes (RVR, CUD, pH e CE) em função das variáveis independentes (tempo e diluições). Para tal efeito, o teste cria dois grupos (grupo 1 e grupo 2) e calcula o p-valor para cada combinação de variáveis dependentes e independentes usadas no experimento.

Tabela 6. Teste *post-hoc*.

Variável dependente	Grupo1	Grupo2	Dif. média	P-valor	Rejeitar
RVR	0 h	160 h	33,60	0,00	Verdadeiro
	0 h	80 h	3,71	0,10	Falso
	160 h	80 h	-29,89	0,00	Verdadeiro
CUD	0 h	160 h	-11,04	0,00	Verdadeiro
	0 h	80 h	2,02	0,63	Falso
	160 h	80 h	13,06	0,00	Verdadeiro
pH	0 h	160 h	-0,28	0,00	Verdadeiro
	0 h	80 h	0,67	0,00	Verdadeiro
	160 h	80 h	0,94	0,00	Verdadeiro
	D 1	D 2	-0,20	0,59	Falso
	D 1	D 3	-0,25	0,43	Falso
	D 2	D 3	-0,06	0,90	Falso
CE	0 h	160 h	0,24	0,90	Falso
	0 h	80 h	-0,20	0,90	Falso
	160 h	80 h	-0,44	0,90	Falso
	D 1	D 2	3,24	0,00	Verdadeiro
	D 1	D 3	4,71	0,00	Verdadeiro
	D 2	D 3	1,47	0,00	Verdadeiro

Fonte: Autoria Própria (2024).

Nota: $p \leq 0,05$

Pode-se inferir que com o propósito de obter valores aceitáveis tanto de RVR quanto de CUD, devem ser tomadas medidas preventivas como, por exemplo, injeção de produtos químicos para desentupimento do sistema de irrigação a partir das 100 h, pois de 0 h às 160 h RVR e CUD têm variação estatisticamente significativa, ao passo que de 0 h às 80 h, não acontece nenhuma variação, entretanto das 80 h às 160 h ocorrem variações dos indicadores de desempenho hidráulico.

Como resultado do teste *post-hoc*, constatou-se que os coeficientes CUD e RVR possuem variação estatisticamente significativa com os tempos de avaliação nos intervalos de 0 h e 160 h e também das 80 às 160 h, não sendo o caso no intervalo de tempo de 0 h às 80 h, no qual o resultado foi não significativo.

A variável pH apresentou variação estatisticamente significativa ao longo do período experimental, porém as diluições não tiveram nenhuma influência sobre essa variabilidade. A CE não foi influenciada pelos tempos de avaliação, embora evidentemente exista relação estatisticamente significativa com as diluições.

CONCLUSÕES

A utilização de análise multivariada de variância gerou resultados importantes, pois possibilitou observar quantitativamente a dinâmica existente entre os atributos químicos pH e CE com o entupimento de emissores por meio de seus indicadores de desempenho hidráulico vazão, CUD e RVR.

O tipo de emissor não teve efeito significativo nos indicadores de entupimento CUD e RVR.

O tempo de avaliação e as diluições usadas apresentaram efeitos significativos nas variáveis pH, CE, CUD e RVR. Ocorreram mudanças em RVR e CUD no intervalo de tempo de 0 h às 160 h e de 80 h às 160 h, ao passo que CUD e RVR não variaram significativamente de 0 h às 80 h.

O pH oscilou com os tempos das avaliações e não como consequência das diluições, ao passo que a CE não variou em função dos tempos de diluições, mas com as diluições.

REFERÊNCIAS

- ABAY, K. A. *et al.* The Russia-Ukraine war: Implications for global and regional food security and potential policy responses. **Global Food Security**, v. 36, 100675, 2023.
- ABDELZAHER, M. A.; AWAD, M. M. Sustainable development goals for the circular economy and the water-food nexus: full implementation of new drip irrigation technologies in upper Egypt. **Sustainability**, v. 14, n. 21, 13883, 2022.
- ALVARES, C. A. *et al.* Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução GHEYI, H. R. *et al* Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 29).
- BAIRD, R. B.; EATON, A. D.; RICE, E. W. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23.ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2017.
- BUSTAN, A. *et al.* Effects of timing and duration of brackish irrigation water on fruit yield and quality of late summer melons. **Agricultural Water Management**, v. 74, n. 2, p. 123-134, 2005.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v. 70, n. 4, p. 355-365, 1998.
- COVA, A. M. W. *et al.* Production and quality of mini watermelon under drip irrigation with brackish water. **Revista Caatinga**, v. 33, p. 766-774, 2020.
- 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.
- FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS-FAO. **The state of food and agriculture 2020: overcoming water challenges in agriculture**. Rome: FAO, 2020.
- GUAN, Y. *et al.* Effect of potassium sulfate on clogging of dripper with muddy water. **Journal of Northwest A & F University-Natural Science Edition**, v. 46, n. 10, p. 137-154, 2018.
- HAN, F. *et al.* Simulating drip irrigation in large-scale and high-resolution ecohydrological models: from emitters to the basin. **Agricultural Water Management**, v. 289, 108500, 2023.
- JOHNSTONE, I. M.; NADLER, B. Roy's largest root test under rank-one alternatives. **Biometrika**, v. 104, n. 1, p. 181-193, 2017.
- KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation desing**. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975.

- LILI, Z. *et al.* Effects of water salinity on emitter clogging in surface drip irrigation systems. **Irrigation Science**, v. 39, p. 209-222, 2021.
- LILI, Z. *et al.* Chemical clogging of emitters and evaluation of their suitability for saline water drip irrigation. **Irrigation and Drainage**, v. 65, n. 4, p. 439-450, 2016.
- LIU, H.; HUANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 745-756, 2009.
- LI, Y. *et al.* Dynamic effects of chemical precipitates on drip irrigation system clogging using water with high sediment and salt loads. **Agricultural Water Management**, v. 213, p. 833-842, 2019.
- LI, Y. *et al.* Effects of lateral flushing on emitter clogging and biofilm components in drip irrigation systems with reclaimed water. **Irrigation Science**, v. 33, p. 235-245, 2015.
- MAHMOUD, M. *et al.* Magnetically treated brackish water new approach for mitigation salinity stress on sunflower productivity and soil properties under South Sinai region, Egypt. **Alexandria Science Exchange Journal**, v. 40, p. 451-470, 2019.
- MERRIAN, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Logan: Utah State University, 1978.
- MIRZAEI, M. M.; ZAKERINIA, M.; FARASATI, M. The effects of phytoremediation of treated urban wastewater on the discharge of surface and subsurface drippers (Case study: Gorgan wastewater treatment plant in northern Iran). **Cleaner Engineering and Technology**, v. 4, 100210, 2021.
- PARRON, L. M.; MUNIZ, D. H. F.; PEREIRA, C. M. **Manual de procedimentos de amostragem e análise físico-química de água**. 1. ed. Colombo: Embrapa, 2011.
- PATTY, S. I. Distribution temperature, salinity and dissolved oxygen in waters Kema, North Sulawesi. **Jurnal Ilmiah Platax**, v. 1, n. 3, p. 148-157, 2013.
- PITTS, D. J.; HAMAN, D. Z.; SMAJSTRLA, A. G. **Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems**. Florida: UF, 1990. 13p. (Bul 258)
- PEIXOTO, F. S. *et al.* Uma cidade sobre as águas: uso e qualidade das águas subterrâneas em Mossoró/RN. **Revista de Estudos Geoducacionais**, v. 12, p. 294-307, 2021.
- ROHIT KATURI, J.; TRIFONOV, P.; ARYE, G. Spatial distribution of salinity and sodicity in arid climate following long term brackish water drip irrigated olive orchard. **Water**, v. 11, n. 12, 2556, 2019.
- RUGEBREGT, M. J. *et al.* Changes in pH associated with temperature and salinity in the Banda Sea. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, 1163, 012001, 2023.
- ŞEYMA, K. O. Ç. *et al.* A Monte Carlo Simulation Study Robustness of Manova Test Statistics in Bernoulli and Uniform Distribution. **Black Sea Journal of Engineering and Science**, v. 2, n. 2, p. 42-51, 2019.

SHARU, E. H.; AB RAZAK, M. S. Hydraulic performance and modelling of pressurized drip irrigation system. **Water**, v. 12, n. 8, 2295, 2020.

SHI, K. *et al.* A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system. **Agriculture**, v. 12, n. 2, 202, 2022.

SILVA, A. H. S. *et al.* Production and water relations of peanut irrigated with brackish water under pulse and continuous drip. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 26, p. 789-796, 2022.

SILVA, J. L. de A. *et al.* Spatial variability of water electrical conductivity and its implications for agricultural planning. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v. 145, n. 12, 05019010, 2019.

SOUSSA, H. K. Effects of drip irrigation water amount on crop yield, productivity and efficiency of water use in desert regions in Egypt. **Nile Basin Water Science & Engineering Journal**, v. 3, n. 2, p. 96-109, 2010.

SHI, K. *et al.* A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system. **Agriculture**, v. 12, n. 2, 202, 2022.

STEVENS, J. P. **Applied multivariate statistic for the social sciences**. 5th ed. New York: Routledge/Taylor & Francis Group, 2009.

TODOROV, V.; FILZMOSER, P. Robust Statistic for the One-way MANOVA. **Computational Statistics & Data Analysis**, v. 54, n. 1, p. 37-48, 2010.

WARNE, R. A primer on multivariate analysis of variance (MANOVA) for behavioral scientists. **Practical Assessment, Research, and Evaluation**, v. 19, n. 1, 17, 2014.

UNITED NATIONS - UN. **General Assembly Resolution 70/1**: Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development. New York: United Nations, 2015. 35p.

(A/RES/70/1). Disponível em:

https://www.un.org/en/development/desa/population/migration/generalassembly/docs/globalcompact/A_RES_70_1_E.pdf. Acesso: 27 set. 2023.

WANG, Y. *et al.* Assessment of water quality ions in brackish water on drip irrigation system performance applied in saline areas. **Agricultural Water Management**, v. 289, 108544, 2023a.

WANG, D. *et al.* Effect of magnetized brackish water drip irrigation on water and salt transport characteristics of sandy soil in southern Xinjiang, China. **Water**, v. 15, n. 3, 577, 2023b.

YASUOR, H.; YERMIYAHU, U.; BEN-GAL, A. Consequences of irrigation and fertigation of vegetable crops with variable quality water: Israel as a case study. **Agricultural Water Management**, v. 242, 106362, 2020.

- YUYANG, S. *et al.* Analysis of mulched drip irrigation with brackish water in cotton fields using the HYDRUS-3D numerical model. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 102, n. 4, p. 959-976, 2022.
- XING, S. *et al.* Simulation and verification of hydraulic performance and energy dissipation mechanism of perforated drip irrigation emitters. **Water**, v. 13, n. 2, 171, 2021.
- XU, T.; ZHANG, L. Influence and analysis of structure design and optimization on the performance of a pit drip irrigation emitter. **Irrigation and Drainage**, v. 69, n. 4, p. 633-645, 2020.
- ZHOU, B. *et al.* Chemical clogging behavior in drip irrigation systems using reclaimed water. **Transactions of the ASABE**, v. 61, n. 5, p. 1667-1675, 2018.
- ZHOU, X. *et al.* Did water-saving irrigation protect water resources over the past 40 years? A global analysis based on water accounting framework. **Agricultural Water Management**, v. 249, 106793, 2021.
- ZHANG, Y. *et al.* Optimizing drip irrigation with alternate use of fresh and brackish waters by analyzing salt stress: the experimental and simulation approaches. **Soil and Tillage Research**, v. 219, 105355, 2022.
- ZHANG, Y. *et al.* Evaluating soil salt dynamics in a field drip-irrigated with brackish water and leached with freshwater during different crop growth stages. **Agricultural Water Management**, v. 244, 106601, 2021.
- ZHANGZHONG, L. *et al.* A kinetic model for the chemical clogging of drip irrigation system using saline water. **Agricultural Water Management**, v. 223, 105696, 2019.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A diluição que possibilitou menor entupimento dos gotejadores foi a D1, ao passo que a diluição D3 acarretou maiores níveis de entupimento.

O emissor ST apresentou maior resistência ao entupimento devido aos seus valores de vazão mais elevados, entretanto o emissor SL foi o mais suscetível ao entupimento, tendo os menores valores de vazão.

As métricas fractais que mais influenciaram na diminuição da vazão média foram a quantidade de manchas da classe 2, a área média da classe 2 e a porcentagem de PLAND da classe 1.

Os indicadores de desempenho hidráulico RVR e CUD variaram em função do tempo, de 0 h às 160 h e de 80 h às 160 h, não havendo mudanças de 0 h às 80 h.

O pH foi influenciado pelos tempos das avaliações, ao passo que a CE foi alterada pelas diluições.

Os scripts Python permitiram que o manejo dos dados fosse altamente eficiente, pois conseguiram compilar grandes quantidades de dados gerados das métricas fractais analisadas.

Os arquivos rasters obtidos da classificação de pixels Maxver, integrado no programa Arcgis, replicaram com alta semelhança o observado nas imagens de microscopia eletrônica de varredura, indicando que o modelo utilizado foi adequado.

No futuro, novos estudos seguindo esta metodologia podem ser desenvolvidos para estudar as relações das imagens com os atributos químicos das águas utilizadas nos sistemas de irrigação por gotejamento.

APÊNDICE

APÊNDICE A - CÓDIGO FONTE PYTHON DA ESTATÍSTICA MULTIVARIADA

IMPORTANDO LIBRERIA ESTADISTICA

```
In [12]: #!pip install factor_analyzer

In [13]: #!pip install pca

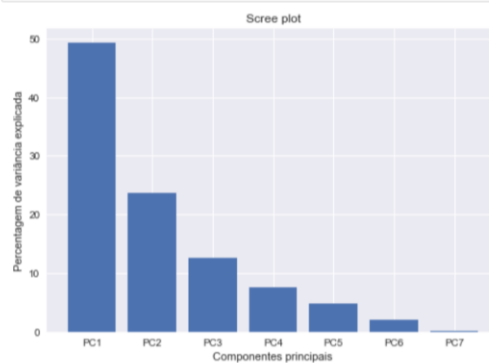
In [221]: import pandas as pd
import numpy as np
import seaborn as sns
from sklearn.decomposition import PCA
from sklearn import preprocessing
from sklearn.datasets import load_iris
import scipy.stats as stats
from factor_analyzer import FactorAnalyzer
from pca import pca
import matplotlib.pyplot as plt
```

SCREE PLOT DE LA EXPLICACION DE LA VARIANZA

```
In [222]: df = pd.read_excel(r'C:\DOCTORADO BRASIL\tesis rafael\tesis\MAYO CORRECCION\pca_1.xlsx')
df.head()
df_scale = preprocessing.scale(df) # Normalizando datos
pca = PCA()
pca.fit(df_scale)
pca_data = pca.transform(df_scale)
per_var = np.round(pca.explained_variance_ratio_* 100, decimals = 2)
labels = ['PC'+ str(x) for x in range (1, len(per_var)+1)]

plt.bar(x= range(1,len(per_var)+1), height = per_var, tick_label = labels,label=per_var)

plt.ylabel('Porcentagem de variância explicada')
plt.xlabel('Componentes principais')
plt.title('Scree plot')
plt.show()
```



```
In [233]: per_var
var = pd.DataFrame(per_var)
e2.index.name = 'Fatores'
var.index.name = "Componentes"
var.rename(index={0: '1',1:'2', 2: '3',3:'4 ',4:'5',5:'6',6:'7'},inplace=True)
var.columns = ['% da variância explicada']

var
#var.to_excel('variacao.xlsx')
```

Out[233]: % da variância explicada

Componentes	
1	49.30
2	23.66
3	12.54
4	7.53
5	4.79
6	2.10
7	0.09

PRUEBA DE BARLETT

```
In [5]: from factor_analyzer.factor_analyzer import calculate_bartlett_sphericity
chi_sqaure_value, p_value = calculate_bartlett_sphericity(df_scale)
chi_sqaure_value, p_value
```

```
Out[5]: (34.121023855174876, 0.035172784717691745)
```

PRUEBA DE KAISER-MEYER-OLKIN (MEASURE OF SAMPLING ADEQUACY)

```
In [6]: from factor_analyzer.factor_analyzer import calculate_kmo
kmo_all, kmo_model = calculate_kmo(df_scale)
kmo_model
```

```
Out[6]: 0.5398265208141749
```

CREANDO EL PCA

```
In [28]: fa = FactorAnalyzer(rotation='oblimin', n_factors=2, method='principal')
fa.fit(df_scale)
```

```
Out[28]: FactorAnalyzer(bounds=(0.005, 1), impute='median', is_corr_matrix=False,
method='principal', n_factors=2, rotation='oblimin',
rotation_kwargs={}, svd_method='randomized', use_smc=True)
```

OBTENIENDO LOADINGS (AUTOVALORES) CARGAS DE LOS COMPONENTES

```
In [241]: loadings = fa.loadings_
loadings
lo = pd.DataFrame(loadings)
lo = lo.round(2)
lo.columns = ['Componente 1', 'Componente 2']
lo = lo.rename(index={0: 'Diluição', 1: 'Emissor', 2: 'Área media classe 1', 3: 'Forma classe 1', 4: 'Círculo circunscrito relacionado classe 2', 5: 'Porcentagem de ocupação classe 2', 6: 'Vazão média'})
lo.to_excel('factores.xlsx')
lo
```

```
Out[241]:
```

	Componente 1	Componente 2
Diluição	-0.85	-0.40
Emissor	-0.25	0.68
Área media classe 1	0.94	0.05
Forma classe 1	0.75	-0.21
Círculo circunscrito relacionado classe 2	0.60	-0.61
Porcentagem de ocupação classe 2	-0.85	0.14
Vazão média	0.32	0.79

```
In [213]: lo = lo
lo['Variaveis'] = ['Diluição', 'Emissor', 'Área media classe 1', 'Forma classe 1', 'Círculo circunscrito relacionado classe 2', 'Porcentagem de ocupação classe 2', 'Vazão média']
lo
ax = lo.plot(kind='scatter', x='Componente 1', y='Componente 2', c='red', s=60, marker='d')
for idx, row in lo.iterrows():
    ax.annotate(row['Variaveis'], (row['Componente 1'], row['Componente 2']), fontsize=12, family='sans-serif', xytext=(-1, 1), textcoords='point')
```



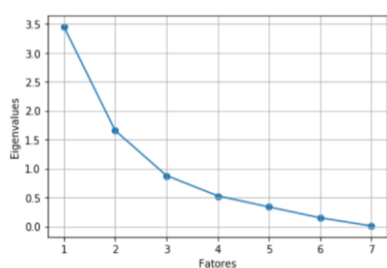
CREANDO LOS EIGENVALUES

```
In [230]: ev, v = fa.get_eigenvalues()
ev
eigenv = pd.DataFrame(ev)
e2=eigenv.round(2)
e2.columns = ['Eigenvalues']
e2.rename(index={0: '1',1:'2', 2: '3',3:'4 ',4:'5',5:'6',6:'7'},inplace=True')
e2.index.name = 'Fatores'

e2
e2.to_excel('eigenvalues.xlsx')
```

CREANDO SCREE PLOT DE LOS EIGENVALUES

```
In [40]: plt.scatter(range(1,df.shape[1]+1),ev)
plt.plot(range(1,df.shape[1]+1),ev)
plt.xlabel('Fatores')
plt.ylabel('Eigenvalues')
plt.grid()
plt.show()
```



APÊNDICE B – CÓDIGO FONTE MANOVA

IMPORTANDO LIBRERIAS

```
In [2]: import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as stats
from statsmodels.sandbox.stats.multicomp import Multicomparison

from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.stats import pearsonr
import numpy as np

import statsmodels.api as sm
from statsmodels.formula.api import ols
from statsmodels.multivariate.manova import MANOVA
from statsmodels.stats.multicomp import pairwise_tukeyhsd
from scipy.stats import levene
from statsmodels.iolib.summary2 import summary_col

pd.options.display.float_format = '{:.2f}'.format
plt.figure(figsize=(30,30))
```

CREACION DEL MODELO - MANOVA

```
In [3]: df60 = pd.read_excel(r'C:\DOCTORADO BRASIL\tesis rafael\tesis\MAYO CORRECCION\2doArtigo\datos_040123.xlsx')
df60 = df60.dropna()

maov = MANOVA.from_formula('CUD + RVR + pH + CE ~ Tratamiento', data = df60)
print(maov.mv_test())
x = pd.DataFrame((maov.mv_test().results['Intercept']['stat']))
x.head()
```

```
Multivariate linear model
=====
```

	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Intercept					
Wilks' lambda	0.0026	4.0000	21.0000	2015.6272	0.0000
Pillai's trace	0.9974	4.0000	21.0000	2015.6272	0.0000
Hotelling-Lawley trace	383.9290	4.0000	21.0000	2015.6272	0.0000
Roy's greatest root	383.9290	4.0000	21.0000	2015.6272	0.0000

```
=====
```

Tratamiento	Value	Num DF	Den DF	F Value	Pr > F
Wilks' lambda	0.0103	8.0000	42.0000	46.3582	0.0000
Pillai's trace	1.0719	8.0000	44.0000	6.3522	0.0000
Hotelling-Lawley trace	87.6839	8.0000	27.7762	224.4075	0.0000
Roy's greatest root	87.5932	4.0000	22.0000	481.7624	0.0000

```
=====
```

APÊNDICE C – CÓDIGO *POST-HOC*

IMPORTANDO LIBRERIAS

```
In [1]: import pandas as pd
import seaborn as sns
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.stats as stats
from statsmodels.sandbox.stats.multicomp import Multicomparison

from scipy.optimize import curve_fit
from scipy.stats import pearsonr
import numpy as np

import statsmodels.api as sm
from statsmodels.formula.api import ols
from statsmodels.multivariate.manova import MANOVA
from statsmodels.stats.multicomp import pairwise_tukeyhsd
from scipy.stats import levene
from statsmodels.iolib.summary2 import summary_col

pd.options.display.float_format = '{:.2f}'.format
plt.figure(figsize=(30,30))
```

MODELO POST HOC

```
In [3]: Mc = pairwise_tukeyhsd(df60['CE'],df60['Tratamento'],alpha = 0.05)
print(Mc)

dfH = pd.DataFrame(data=Mc._results_table.data[1:], columns=Mc._results_table.data[0])# converter objeto a dataframe
dfH.head()
dfH.to_excel('post.xlsx')
```

Multiple Comparison of Means - Tukey HSD, FWER=0.05

```
=====
group1 group2 meandiff p-adj lower upper reject
-----
D 1    D 2    3.2389 0.001 2.8783 3.5994   True
D 1    D 3    4.7122 0.001 4.3517 5.0728   True
D 2    D 3    1.4733 0.001 1.1128 1.8339   True
=====
```