



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

HUDSON SALATIEL MARQUES VALE

**ANÁLISE DO NÍVEL DE OBSTRUÇÃO EM GOTEJADORES OPERANDO COM
DILUIÇÕES DE ÁGUA PRODUZIDA TRATADA**

MOSSORÓ
2019

HUDSON SALATIEL MARQUES VALE

**ANÁLISE DO NÍVEL DE OBSTRUÇÃO EM GOTEJADORES OPERANDO COM
DILUIÇÕES DE ÁGUA PRODUZIDA TRATADA**

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

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

Orientador: Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista

MOSSORÓ
2019

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

V149a Vale, Hudson Salatiel Marques.
Análise do nível de obstrução em gotejadores operando com diluições de água produzida tratada / Hudson Salatiel Marques Vale. - 2019.
129 f. : il.

Orientador: Rafael Oliveira Batista.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em , 2019.

1. Emissores. 2. Entupimento. 3. Petróleo. 4. Reuso. I. Batista, Rafael Oliveira, orient. II. Título.

HUDSON SALATIEL MARQUES VALE

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

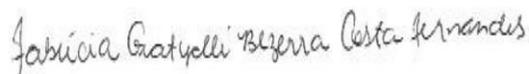
Linha de pesquisa: Impactos ambientais pelo uso do solo e da água.

Defendida em: 28/02/2019

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Rafael Oliveira Batista - UFERSA
Presidente



Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa
Membro Externo ao PPGMSA



Prof. Dr. Rodrigo César Santiago
Membro Externo ao PPGMSA



Prof.ª Dra. Daniela da Costa Leite Coelho
Membro Externo ao PPGMSA



Prof. Dr. Ketson Bruno da Silva
Membro Externo à UFERSA - Prefeitura Municipal do Assu

Ao meu avô materno, **Francisco Marques dos Santos** (*in memoriam*).

DEDICO

A minha mãe, **Adenilza Marques da Silva** e minha irmã, **Nivia Paula Marques Vale** pelo amor e apoio incondicional.

A minha esposa, **Danniely de Oliveira Costa**, por estar sempre ao meu lado e fazer parte da minha vida.

OFEREÇO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela presença em cada momento da minha vida, dando-me força e oportunidades, para que eu possa continuar nessa caminhada de desafios e realizações.

À minha mãe, Adenilza Marques da Silva, minha irmã, Nivia Paula Marques Vale Alves e meu tio, Vanildo Marques, meu alicerce, que através de todo carinho e amor, dedicaram-me momentos preciosos de apoio e incentivo, na vida pessoal e profissional.

À minha esposa, Danniely de Oliveira Costa, que esteve ao meu lado desde o início dessa jornada, estando sempre presente, vibrando com minhas conquistas e vitórias, me consolando nos momentos difíceis, sempre disposta a ouvir e aconselhar.

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

Ao meu orientador Prof. D. Sc. Rafael Oliveira Batista pela oportunidade, paciência, infinita disponibilidade e confiança em mim, repassando um pouco dos seus conhecimentos e tornando possível a realização de mais este sonho. Acima de tudo por ser responsável pelo meu aprendizado tanto pessoal como profissional sendo em alguns momentos como um pai, um exemplo de homem e profissional ao qual sempre terei como exemplo em minha vida.

Aos Conselheiros da banca examinadora, Dra. Fabrícia Gratyelli Bezerra Costa, Prof. Dr. Rodrigo César Santiago, Prof.^a Dra. Daniela da Costa Leite Coelho e Prof. Dr. Ketson Bruno da Silva pelas sugestões e contribuições para melhoria do presente trabalho.

Ao servidor e primo Sérvulo Eduardo Soares Dantas, pelas análises por microscopia óptica no Laboratório de Biologia Tecidual e do Desenvolvimento da UFERSA.

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

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

Aos meus primos Thiago Marques, Vanildo Marques Júnior, Douglas Marques, Cecília Marques, Gabriela Marques, Raphaella Marques pelas conversas e brincadeiras sempre que nos encontramos.

Aos meus amigos, em especial à Luiz Eduardo, Eduardo Bruno, Raimundo Fernandes Júnior, Tayd Dayvison, Hélio Nogueira, Paulo Roberto, Tayron Amaral, Thiago França, Michel Nascimento, Dennys Fowler, Gabriel Carlos, Gabriel Gadelha, Gilson Freire, Rômulo Negreiros, Lázaro Lima e Paulo César (*in memoriam*), que sempre estiveram ao meu lado e torceram por mim, proporcionando muitos momentos de alegria, mostrando-me o verdadeiro sentido de amizade.

Às minhas amigas, em especial à Gabriela de Oliveira, Salma Luana, Ianne Melo, Raquel Karuliny, Laura Carlos, Larissa Luana, Priscila Costa, Clara Nívea, Juliana Pedrosa, Sanary Dias, Alessandra Dantas, Brenda Catarina, Sthenia Amora, Karol Brasil, Jessica Chrysthianne e Suyanne Soares que estiveram sempre comigo e as quais sei que posso contar em todos os momentos da minha vida.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido pela formação acadêmica e oportunidade de concluir o Curso de Doutorado em Manejo de Solo e Água.

À CAPES pelo apoio financeiro durante todo o programa.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água por contribuírem na minha formação profissional.

Às demais pessoas, que não foram citadas, mas que em algum momento fizeram parte da minha vida e deixaram marcas importantes, meus sinceros agradecimentos.

Muito obrigado!

“Seja a mudança que você quer ver no mundo”

Mahatma Gandhi

RESUMO

VALE, H. S. M. Análise do nível de obstrução em gotejadores operando com diluições de água produzida tratada. 2019. 126f. Tese (Doutorado em Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

A água produzida representa a corrente de efluentes líquidos de maior volume oriunda das atividades de produção de petróleo. Em virtude da escassez de água no semiárido brasileiro, a utilização desse efluente na agricultura via sistema de irrigação por gotejamento pode tornar-se uma estratégia eficaz para a região. No entanto, deve-se levar em consideração a vulnerabilidade dos gotejadores ao entupimento, podendo ser amenizada com a técnica da diluição em água. Nesse contexto, o presente trabalho objetivou analisar o desempenho hidráulico de unidades gotejadoras aplicando diluições de água produzida tratada em água subterrânea. Para isso, foram montadas cinco bancadas experimentais em área experimental do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente, localizado no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN. Para avaliação do desempenho hidráulico e detecção do nível de entupimento dos gotejadores, aplicando água produzida tratada (AP) diluída em água subterrânea (AS), durante 160 h, montou-se um experimento no delineamento inteiramente casualizado (DIC), em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições; tendo nas parcelas os cinco tratamentos (T1 - 100% AS; T2 - 90% AS e 10% AP; T3 - 80% AS e 20% AP; T4 - 70% AS e 30% AP e T5 - 60% AS e 40% AP), nas subparcelas os três tipos de gotejadores não autocompensantes (G1 - 1,6 L h⁻¹, G2 - 1,6 L h⁻¹ e G3 - 1,7 L h⁻¹) e nas subsubparcelas os tempos de avaliação (0, 40, 80, 120 e 160 h) da uniformidade de distribuição do efluente. A cada 40 h de funcionamento, avaliou-se os seguintes indicadores de desempenho hidráulico: vazão (Q), vazão relativa (QR) e os coeficientes de redução da vazão relativa (RQR), de uniformidade de distribuição (CUD), de variação de vazão (CVQ) e de uniformidade estatística (Us). Paralelamente, foram feitas análises físico-químicas das diluições de água produzida tratada. Decorridas as 160 h, montou-se um segundo experimento para obtenção das curvas de vazão em função da pressão de serviço para cada modelo de gotejador. Para realização das análises estatísticas dos dados utilizou-se o programa computacional Sistema para Análises Estatísticas Versão 9.1. Dentre as características físico-químicas das diluições, apenas o pH representou risco severo de entupimento de gotejadores, enquanto os atributos CE, Ca²⁺, Mg²⁺, SS e SD representaram risco de entupimento classificado como baixo. Os modelos de regressão linear, quadrático e raiz quadrada foram os que melhor se ajustaram à relação entre as variáveis de desempenho hidráulico Q, QR, RQR, CUD, CVQ e Us, em função do tempo de operação das unidades de irrigação. Os modelos de regressão linear e quadrático ajustaram-se melhor à variável vazão (Q), em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais. A maior suscetibilidade ao entupimento foi verificada para o gotejador G2, quando submetido ao tratamento T5 (60% AS e 40% AP), devido, provavelmente, a sua menor área de filtração e a formação de incrustação sobre ela. O gotejador G2, mesmo operando sob a máxima pressão recomendada (100 kPa), não atingiu a vazão nominal informada pelo fabricante, o que pode comprometer o desempenho do sistema. O gotejador G3, quando submetido aos tratamentos T1 (100% AS) ao T3 (80% AS e 20% AP), é o mais recomendado na operação com água produzida tratada diluída.

Palavras-chave: Emissores. Entupimento. Petróleo. Reuso.

ABSTRACT

VALE, H. S. M. Analysis of the level of obstruction in drippers operating with dilutions of treated produced water. 2019. 126f. Thesis (Doctor of Science in Manejo de Solo e Água), Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró, 2019.

The water produced represents the largest volume of liquid effluent from the oil production activities. Because of the shortage of water in the Brazilian semiarid region, the use of this effluent in agriculture through drip irrigation system can become an effective strategy for the region. However, the vulnerability of drippers to clogging should be taken into account and may be mitigated by the dilution technique in water. In this context, this study aimed to analyze the performance hydraulic units gotejadoras by applying dilutions of produced water treated in underground water. For that, five experimental stands were set up in an experimental area of the Laboratory of Rural Constructions and Ambiente, located in the East Campus of the Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró-RN. To evaluate the hydraulic performance and detection of the level of clogging of the drippers by applying produced water treatment (PW) diluted in underground water (UW) for 160 h, a completely randomized experiment (DIC) was set up in a subdivided, with three replicates; having in the plots the five treatments T1 - 100% UW; T2 - 90% AS and 10% PW; T3 - 80% UW and 20% PW; T4 - 70% UW and 30% PW and T5 - 60% UW and 40% PW, in the subplots the three types of non-self-compensating drippers (G1 - 1,6 L h⁻¹, G2 - 1,6 L h⁻¹ and G3 - 1,7 L h⁻¹ and in the subsubparcels the evaluation times (0, 40, 80, 120 and 160 h) of the effluent distribution uniformity. The following hydraulic performance indicators were evaluated every 40 h: flow (Q), relative flow (QR) and coefficients relative flow reduction (RQR), distribution uniformity (CUD), flow variation (CVQ) and statistical uniformity (Us). At the same time, physico-chemical analyzes of the dilutions of treated produced water were made. After 160 h, a second experiment was set up to obtain the flow versus service pressure curves for each drip model. Statistical analysis of the data was carried out using the statistical software System for Statistical Analysis Version 9.1. Among the physico-chemical characteristics of the dilutions, only pH represented a severe risk of drip obstruction, while the attributes CE, Ca²⁺, Mg²⁺, SS and SD represented a risk of obstruction classified as low. The linear, quadratic and square root regression models were the ones that best fit the relationship between the hydraulic performance variables Q, QR, RQR, CUD, CVQ and Us, as a function of the operating time of the irrigation units. The linear and quadratic regression models were better fitted to the flow variable (Q), as a function of the position of the drippers along the lateral lines. The highest susceptibility to clogging was verified for G2 dripper, when submitted to T5 treatment (60% UW and 40% PW), probably due to its smaller filtration area and the formation of scale on it. The G2 dripper, even operating under the recommended maximum pressure (100 kPa), has not reached the nominal flow rate reported by the manufacturer, which may compromise system performance. The G3 dripper, when submitted to T1 (100% UW) treatments to T3 (80% UW and 20% PW), is the most recommended in the operation with diluted treated water.

Key words: Emitters. Clogging. Oil. Reuse.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Produção de petróleo, por localização (terra e mar), segundo unidades da federação – 2017	5
Tabela 2. Condições e padrões de modalidades de reuso da água para o Estado do Ceará	10
Tabela 3. Padrões de reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará.....	11
Tabela 4. Parâmetros específicos para reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará.....	12
Tabela 5. Parâmetros específicos por tipologia do empreendimento para reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará	13
Tabela 6. Principais constituintes químicos associados aos problemas de entupimento.....	20
Tabela 7. Características física, químicas e biológica das águas residuárias que representam risco de obstrução de gotejadores	22
Tabela 8. Especificações técnicas e imagens dos gotejadores não autocompensantes ensaiados por 160 h com diluições de água produzida tratada	37
Tabela 9. Análise de variância de um experimento em parcelas subdivididas no delineamento inteiramente casualizado (DIC)	48
Tabela 10. Valores médios e desvios padrão das características físico-químicas da água produzida tratada diluída, em comparação aos padrões referentes ao uso agrícola e risco de obstrução dos gotejadores.....	51
Tabela 11. Equações de regressão ajustadas à variável Q em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	56
Tabela 12. Equações de regressão ajustadas à variável QR em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	59
Tabela 13. Equações de regressão ajustadas à variável RQR em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	63
Tabela 14. Equações de regressão ajustadas à variável CUD em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	66
Tabela 15. Equações de regressão ajustadas à variável CVQ em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	70
Tabela 16. Equações de regressão ajustada a variável Us em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.....	73
Tabela 17. Equações de regressão da vazão do gotejador G1, em $L h^{-1}$, sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h).....	77

Tabela 18. Equações de regressão da vazão do gotejador G2, em L h ⁻¹ , sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h).....	79
Tabela 19. Equações de regressão da vazão do gotejador G3, em L h ⁻¹ , sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h).....	82
Tabela 20. Resumo da análise de variância obtida das variáveis Q, CUD, CVQ, Us, QR e RQR das unidades gotejadoras, no esquema de parcelas subdivididas	83
Tabela 21. Valores médios da vazão (Q, em L h ⁻¹) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento.....	84
Tabela 22. Valores médios da vazão relativa (QR, em decimal) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento	87
Tabela 23. Valores médios do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento.	88
Tabela 24. Valores médios do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento	90
Tabela 25. Valores médios do coeficiente de variação de vazão (CVQ, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento	91
Tabela 26. Valores médios do coeficiente de uniformidade estatística (Us, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento	93
Tabela 27. Equações de regressão ajustadas à variável vazão (Q) em função da pressão de operação (P) dos gotejadores (G1, G2 e G3) operando com diferentes tipos de tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) e os respectivos coeficientes de determinação (R ²).....	98

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da bacia sedimentar Potiguar.....	4
Figura 2. Esboço de um reservatório típico de petróleo e gás.....	6
Figura 3. Matriz celular do biofilme apresentando: série de Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE) espessada (A) e visão ampliada da área de inserção vermelha da imagem anterior mostrando a estrutura da rede da matriz do biofilme (B).....	18
Figura 4. Localização da área experimental	33
Figura 5. Vista geral de uma das cinco bancadas experimentais (A) composta por linha de derivação e nove linhas laterais (B), conjunto motobomba de 0,5 cv, filtro de tela, registro de gaveta, ponto para coleta de amostras, manômetro analógico (C) e reservatório de 0,31 m ³ (D)	35
Figura 6. Esquema da bancada experimental elaborada no Google SketchUp Free (2018)	36
Figura 7. Esquema do delineamento experimental utilizado na condução dos ensaios experimentais.....	38
Figura 8. Sistema de filtragem à vácuo utilizado para determinação de sólidos suspensos.....	44
Figura 9. Microscópio óptico Olympus BX51	45
Figura 10. Gráficos da vazão (Q) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	54
Figura 11. Gráficos da vazão relativa (QR) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	58
Figura 12. Gráficos do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	61
Figura 13. Gráficos do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	65
Figura 14. Gráficos do coeficiente de variação de vazão (CVQ) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	68
Figura 15. Gráficos de uniformidade estatística (Us) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada	72
Figura 16. Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G1 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS (A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas.....	76
Figura 17. Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G2 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS	

(A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas.....	78
Figura 18 - Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G3 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS (A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas.....	81
Figura 19. Imagem do desenvolvimento da incrustação no interior dos gotejadores G1 (A), G2 (B) e G3 (C) que aplicaram água produzida tratada diluída.....	94
Figura 20. Análise por microscopia óptica da incrustação formada no interior dos gotejadores G1, G2 e G3, observado através das lentes objetivas de 40x (A) e 100x (B) de aumento	95
Figura 21. Curvas relacionando vazão (Q) e pressão de serviço dos gotejadores G1 (A), G2 (B) e G3 (C) operando com diluições de água produzida tratada.....	97

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANA	Agência Nacional de Águas
ANP	Agência Nacional do Petróleo
AP	Água Produzida Tratada
AS	Água Subterrânea
BTEX	Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno
CE	Condutividade Elétrica
CNP	Conselho Nacional do Petróleo
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
CT	Coliformes Totais
CUD	Coefficiente de Uniformidade de Distribuição
CV	Coefficiente de Variação
CVQ	Coefficiente de Variação de Vazão
DCAF	Departamento de Ciências Agrárias e Florestais
DECAM	Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
Dur	Dureza
HPA	Hidrocarbonetos Poliaromáticos
LASAP	Laboratório de Análises de Solo, Água e Planta
LQA	Laboratório de Qualidade Ambiental
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MRON	Materiais Radioativos de Ocorrência Natural
NBR	Normas Brasileiras
NFD	Naftalenos, Fenotrenos e Dibenzotiofenos
P	Pressão de Serviço
pH	Potencial Hidrogeniônico
PLFAs	Ácidos Graxos fosfolipídicos
Q	Vazão dos Gotejadores
QR	Vazão Relativa
RAS	Razão de Adsorção de Sódio

RQR	Coeficiente de Redução da Vazão Relativa
SD	Sólidos Dissolvidos
SDT	Sólidos Dissolvidos Totais
SEMACE	Superintendência Estadual do Meio Ambiente do Ceará
SPE	Substâncias Poliméricas Extracelulares
SS	Sólidos Suspensos
ST	Sólidos Totais
UFC	Unidades Formadoras de Colônias
UFERSA	Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Us	Coeficiente de Uniformidade Estatística

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 OBJETIVOS	3
2.1 Objetivo geral.....	3
2.2 Objetivos específicos.....	3
2 REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Água produzida de petróleo	4
2.1.1 Composição química	6
2.1.2 Legislação aplicada ao reuso da água	8
2.1.3 Impactos ambientais relacionados ao uso da água produzida para fins agrícolas....	14
2.2 Entupimento de gotejadores aplicando água residuária	16
2.2.1 Adesão de colônias isoladas de bactérias nos gotejadores	17
2.2.2 Combinação dos agentes ocasionadores de obstrução	19
2.2.3 Características estruturais e hidráulicas de gotejadores que interferem no entupimento	23
2.3 Modelos empíricos aplicados ao entupimento de gotejadores.....	24
2.3.1 Indicadores de desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento..	25
2.3.2 Avaliação em função do manejo operacional do sistema de irrigação	29
2.3.3 Avaliação em função da qualidade do efluente.....	30
2.3.4 Avaliação em função da comunidade microbiana do emissor	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	33
3.1 Caracterização da área experimental e período de estudo	33
3.2 Coleta e transporte do efluente utilizado no experimento	34
3.3 Montagem das plataformas de ensaios	34
3.4 Tratamentos utilizados.....	37
3.5 Condução dos experimentos	38
3.5.1 Experimento I: Desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida em água subterrânea	39
3.5.1.1 Monitoramento das características físico-químicas das diluições de água produzida tratada em água subterrânea	39
3.5.1.2 Análise da incrustação formada nas unidades gotejadoras.....	45
3.5.2 Experimento II: Obtenção das curvas vazão em função da pressão de serviço de gotejadores aplicando diluições de água produzida tratada	46
3.5.3 Experimentação e análise estatística	47
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1 Experimento I	50

4.1.1	Análise das características físico-químicos da água produzida tratada diluída em água subterrânea	50
4.1.2	Desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida tratada	53
4.1.2.1	Vazão dos gotejadores (Q)	53
4.1.2.2	Vazão relativa (QR).....	57
4.1.2.3	Coeficiente de redução da vazão relativa (RQR)	60
4.1.2.4	Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).....	63
4.1.2.5	Coeficiente de variação de vazão (CVQ)	67
4.1.2.6	Coeficiente de uniformidade estatística (Us).....	71
4.1.3	Vazão dos gotejadores (Q) ao longo das linhas laterais operando com diluições de água produzida tratada	74
4.1.4	Análise de variância dos indicadores de desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida tratada	83
4.1.5	Análise das médias dos indicadores de desempenho das unidades gotejadoras aplicando água produzida tratada diluída.....	84
4.1.5.1	Análise das médias da vazão dos gotejadores (Q).....	84
4.1.5.2	Análise das médias da vazão relativa (QR)	86
4.1.5.3	Análise das médias do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR)	88
4.1.5.4	Análise das médias do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD).....	89
4.1.5.5	Análise das médias do coeficiente de variação de vazão (CVQ)	91
4.1.5.6	Análise das médias do coeficiente de uniformidade estatística (Us).....	93
4.1.6	Análise visual e por microscopia óptica da incrustação formada nos gotejadores ..	94
4.2	Experimento II.....	96
4.2.1	Curvas relacionando vazão em função da pressão de serviço para distintos gotejadores operando com diluições de água produzida tratada	96
5	CONCLUSÕES.....	100
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

1 INTRODUÇÃO

A água está diretamente atrelada à sustentabilidade socioambiental do desenvolvimento, sendo fundamental a sua apropriação para o atendimento das necessidades básicas dos seres humanos e para o equilíbrio ambiental. No entanto, o crescimento populacional e o desenvolvimento industrial, combinados ao uso irracional desse recurso, tem aumentado significativamente a demanda por água doce e a produção de águas residuárias no mundo.

No Brasil, os usos mais significativos, em termos de retirada de água, são a irrigação e o abastecimento urbano, que representam 46,2 e 23,3% da retirada total, respectivamente (ANA, 2017). O atual modelo de apropriação hídrica para os mesmos fins excede a velocidade de reposição natural desse recurso no ecossistema terrestre, ocasionando sua escassez com a configuração de conflitos hídricos, afetando milhares de pessoas.

No caso da região semiárida nordestina, esse problema é agravado devido às baixas precipitações pluviométricas e sua irregular distribuição espacial. Estas condições tornam a água potável um bem precioso e, dessa forma, em determinadas épocas do ano, a sua disponibilidade visa atender prioritariamente as necessidades básicas da população, como consumo e higienização pessoal.

Sendo assim, devido à crescente demanda por água pela agricultura irrigada, uma das alternativas eficientes para minimizar esse consumo seria a utilização de águas com características físico-químicas de menor qualidade, como as águas residuárias.

Estudos a respeito da água residuária obtida em campos petrolíferos e sua aplicação no sistema solo-planta vêm sendo desenvolvidos (Burkhardt et al., 2015; Sousa et al., 2016), sendo esta uma alternativa que pode tornar-se promissora para regiões semiáridas.

Esta água encontra-se aprisionada nas formações subterrâneas, ou seja, faz parte da água de formação natural existente abaixo ou dentro do reservatório de petróleo e gás, sendo denominada de água de formação (Munirasu et al., 2016). Após ser trazida à superfície durante as atividades de produção destes fluidos, passa a ser chamada pela indústria de petróleo de água produzida (Amini et al., 2012).

A região Nordeste brasileira tem algumas bacias sedimentares com centenas de campos petrolíferos, nas quais cerca de 44 milhões de barris de petróleo são extraídos anualmente. A bacia Potiguar estende-se pelos Estados do Rio Grande do Norte e do Ceará, sendo sua porção terrestre classificada como madura, ou seja, apresenta-se em estado avançado de exploração (ANP, 2018).

Para a disposição de águas residuárias na agricultura, é necessário levar em consideração os padrões de qualidade de água de acordo com a legislação vigente, sendo monitorada a segurança

dos trabalhadores envolvidos e os impactos da aplicação ao ambiente. Se bem planejada, esta aplicação pode trazer benefícios, tais como: fornecimento de nutrientes e água para as plantas, redução do uso de fertilizantes e de seu potencial poluidor.

Em termos de métodos de irrigação, a aplicação via sistema de irrigação por gotejamento destaca-se como sendo a mais promissora, do ponto de vista ambiental, devido a sua elevada eficiência de aplicação e ao baixo risco de contaminação do produto agrícola e de operadores no campo, visto que atua por meio de gotas d'água emitidas diretamente nas proximidades da zona radicular da planta (Souza et al., 2011).

Porém, os sistemas de irrigação por gotejamento apresentam alta suscetibilidade ao entupimento do emissor (Liu & Huang, 2009) quando as águas residuárias são aplicadas (Dazhuang et al., 2009; Batista et al., 2013a).

Entre os principais compostos constituintes da água produzida estão o óleo, minerais dissolvidos da formação, compostos químicos residuais da produção, sólidos da produção e microrganismos (Fakhru'l-Razi et al., 2009); tais componentes podem afetar o desempenho hidráulico e a eficiência do sistema de irrigação.

Os períodos recorrentes de escassez hídrica no semiárido nordestino, o grande volume de água produzida gerado da exploração de petróleo na região e a inexistência de informações, no Brasil e no mundo, sobre os efeitos desse resíduo no desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento, tornaram necessário e importante o desenvolvimento da presente pesquisa.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo geral

Analisar o desempenho hidráulico de unidades gotejadoras aplicando diluições de água produzida tratada em água subterrânea.

2.2 Objetivos específicos

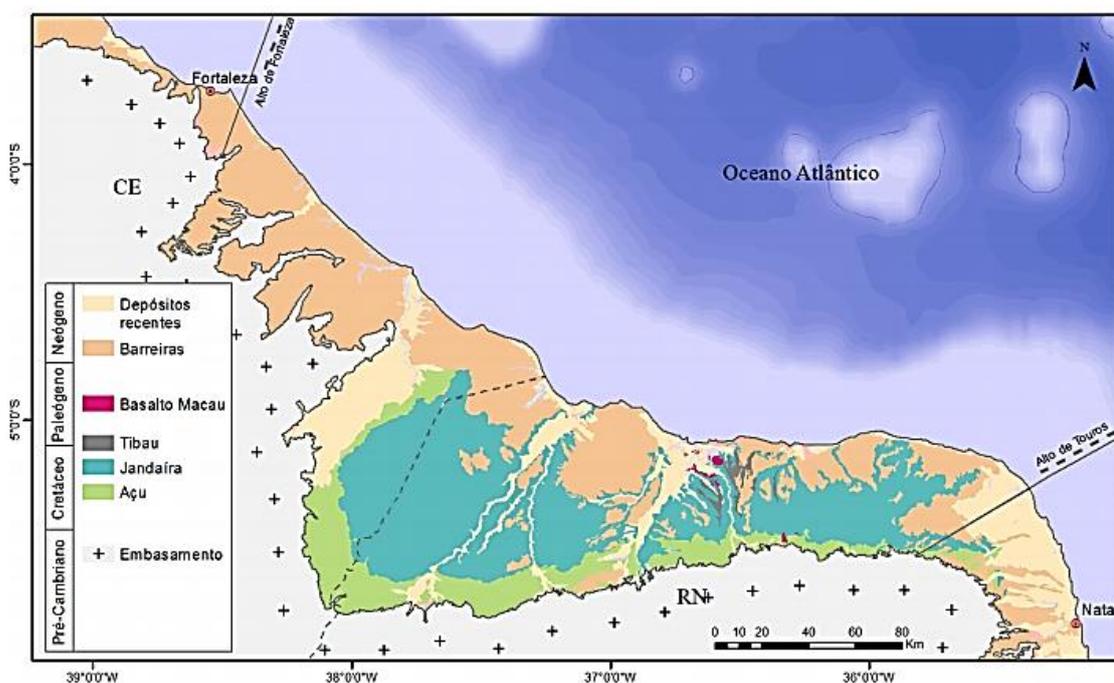
- a) Identificar as características físico-químicas e microbiológicas das diluições de água produzida tratada e classificar o risco de entupimento de acordo com a sua concentração;
- b) Monitorar os indicadores de desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com as diluições de água produzida tratada;
- c) Verificar quais modelos de regressão melhor se ajustaram às variáveis de desempenho hidráulico em função do tempo de operação;
- d) Identificar quais modelos de regressão explicam melhor a relação entre a variável vazão e a posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais;
- e) Observar se há presença de biofilme nos gotejadores por meio de microscopia;
- f) Indicar, com base nos resultados e modelos empíricos, qual tipo de gotejador é mais recomendado na operação com água produzida tratada diluída; e,
- g) Obter o comportamento (ou desempenho) da vazão dos gotejadores em função das distintas pressões de serviço aplicando diluições de água produzida tratada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Água produzida de petróleo

O petróleo é o recurso energético que influencia o dinamismo tecnológico e o conforto da sociedade moderna (Gomes, 2014). No cenário mundial, o Brasil ocupava a décima posição em 2017 com 2,95% da produção mundial, equivalente a 2,73 milhões de barris de petróleo por dia (ANP, 2018).

No país, a região Nordeste tem algumas bacias sedimentares com centenas de campos petrolíferos, das quais cerca de 44 milhões de barris de petróleo são extraídos anualmente (ANP, 2018). A bacia Potiguar localiza-se na porção mais oriental da região Nordeste, estendendo-se pelos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará. Geologicamente, limita-se a leste com a Bacia de Pernambuco-Paraíba pelo Alto de Touros, a noroeste com a Bacia do Ceará pelo Alto de Fortaleza e a sul com rochas do embasamento cristalino (Portella & Fabianovicz, 2017), conforme ilustrado na Figura 1.



Fonte: Angelim et al. (2006).

Figura 1. Mapa de localização da bacia sedimentar Potiguar

A porção terrestre da bacia Potiguar é classificada como madura, ou seja, apresenta-se em estado avançado de exploração, com infraestrutura bem desenvolvida e mão de obra local especializada (ANP, 2017).

A exploração de hidrocarbonetos na referida bacia sedimentar teve início em 1949, com mapeamentos de superfície e levantamentos gravimétricos e magnetométricos conduzidos pelo Conselho Nacional do Petróleo (CNP). Em 1956, após a criação da Petrobras, foram perfurados dois poços estratigráficos na porção emersa da bacia. Na década de 70, no contexto da primeira crise do petróleo, foram retomadas as atividades exploratórias na bacia com aquisição sísmica nas suas porções marinha e terrestre. Recentemente, em março de 2017, a bacia Potiguar produziu um total de 51.476 barris de petróleo por dia; essa produção advém da exploração de 77 campos petrolíferos (Portella & Fabianovicz, 2017).

O Estado do Rio Grande do Norte ocupa posição de destaque no país, sendo o quarto estado com maior produção de petróleo em solo e mar, gerando 17,30 milhões de barris no ano de 2017. Além disso, é o estado brasileiro com maior produção de petróleo em solo, gerando 15,20 milhões de barris nesse mesmo ano, conforme apresentado na Tabela 1 (ANP, 2018).

Tabela 1. Produção de petróleo, por localização (terra e mar), segundo unidades da federação – 2017

Unidades da federação	Localização		Produção total de petróleo - Ano 2017 (milhões barris)
	Terra	Mar	
Brasil	46,38	910,55	956,93
Rio de Janeiro	-	650,85	650,85
Espírito Santo	3,89	133,87	137,76
São Paulo	-	120,01	120,01
Rio Grande do Norte	15,20	2,10	17,30
Bahia	11,63	0,21	11,84
Sergipe	6,57	1,90	8,47
Amazonas	7,48	-	7,48
Ceará	0,45	1,56	2,01
Alagoas	1,14	0,05	1,19
Maranhão	0,013	-	0,013

Fonte: Adaptado de ANP (2018).

Ao longo da vida produtiva de um campo de petróleo ocorre a produção simultânea de gás, óleo e água (Haghshenas & Nasr-El-Din, 2014). A origem da água produzida está diretamente ligada à formação das bacias sedimentares, assim como a origem do petróleo, fazendo-se presente nas formações. Esta água encontra-se aprisionada nas formações subterrâneas, ou seja, faz parte da água de formação natural existente abaixo ou dentro do reservatório de petróleo e gás (Figura 2), sendo denominada de água de formação (Munirasu et al., 2016). Após ser trazida à superfície durante as atividades de produção desses fluidos passa a ser chamada pela indústria de petróleo de água produzida (Amini et al., 2012).



Fonte: Adaptado de Igunnu & Chen (2014).

Figura 2. Esboço de um reservatório típico de petróleo e gás

Globalmente, entre os anos de 1990 a 2015, a quantidade estimada de água produzida aumentou mais de 78%, de cerca de 10,6 bilhões para 18,9 bilhões de m³, em comparação com 38% de crescimento da produção de petróleo de 3,7 bilhões para 5,1 bilhões de m³ (SPE, 2011; BP, 2017). Estima-se que em 2020 o volume de água produzida, apenas em campos *onshore*, atinja cerca de 29 bilhões de m³ (Stanic, 2014; BP, 2017).

2.1.1 Composição química

A água produzida apresenta composição química variada, influenciada pela formação geológica do campo produtor, condições operacionais e tempo decorrido do início de produção do reservatório (Igunnu & Chen, 2014; Abousnina et al., 2015; Pichtel, 2016).

Os principais compostos químicos constituintes da água produzida são óleo, minerais dissolvidos da formação, compostos químicos residuais da produção e gases dissolvidos (Fakhru'l-Razi et al., 2009).

O óleo é formado por uma mistura de vários compostos como benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno (BTEX), naftalenos, fenantrenos e dibenzotiofenos (NFD), hidrocarbonetos poliaromáticos (HPA) e fenóis, podendo estar presente na água produzida sob as seguintes formas:

- Óleo livre: óleo disperso sob a forma de gotas de grandes diâmetros, acima de 100 µm. É formado por hidrocarbonetos praticamente insolúveis, tais como os aromáticos, polinucleares, policiclo-parafinas e parafinas pesadas. O óleo livre pode ser facilmente removido da água, através de separadores gravitacionais (Motta et al., 2013).
- Óleo em emulsão: óleo disperso presente sob a forma de gotas de pequenos diâmetros, variando entre 20 e 100 µm. É também formado por hidrocarbonetos praticamente insolúveis.

Essa forma de óleo é mais difícil de ser separada da água. De fato, os diâmetros das gotas de emulsão podem atingir valores bem pequenos, na faixa de micrômetros ou submicrômetros (Fakhur'l-Razi et al., 2009).

- Óleo solúvel: composto pelos hidrocarbonetos menos insolúveis na água, como BTEX e por fenóis (Motta et al., 2013).

Os minerais dissolvidos da formação incluem os sólidos dissolvidos totais (SDT) e os metais pesados.

Os SDT são constituintes orgânicos compostos por cátions (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Ba^{2+} , Sr^{2+} , Fe^{2+}) e ânions (Cl^- , SO_4^{2-} , CO_3^{2-} , HCO_3^-). Desses, predominam o Na^+ e o Cl^- . A concentração de SDT na água produzida varia de valores menores que 100 até 300.000 mg L^{-1} , dependendo da localização geográfica, da idade e tipo do reservatório de petróleo (Stewart & Arnold, 2011).

Com relação aos metais pesados, predominam na água produzida traços de cádmio, cromo, cobre, chumbo, mercúrio, níquel, prata e zinco; além de materiais radioativos de ocorrência natural (MRON), principalmente o rádio, que é o coprecipitado da água produzida juntamente com outros tipos de incrustações (Motta et al., 2013).

Além dos compostos mencionados anteriormente, uma grande variedade de aditivos químicos está disponível para uso nos sistemas de produção de óleo e gás e podem conseqüentemente serem adicionados à água produzida. Estes produtos químicos são utilizados para auxiliar na recuperação e bombeamento de hidrocarbonetos, proteger o sistema de corrosão, facilitar a separação do óleo, gás e água e prevenir a formação de hidrato de metano (gelo) no sistema de produção, danificando-o. Dentre os aditivos utilizados incluem-se inibidores, desemulsificadores e químicos tratadores de gás (Fakhru'l-Razi et al., 2009). Muitos desses compostos são solúveis em óleo e permanecem junto a este durante o tratamento da água de produção. Já outros, por serem solúveis em água, são descartados juntamente com a mesma, entretanto correspondem à minoria, uma vez que baixas concentrações destes compostos são encontradas na água produzida (Bakke et al., 2013).

No caso dos gases dissolvidos, os mais comumente encontrados na água produzida são: gás natural (metano, etano, propano e butano), CO_2 e H_2S . O H_2S pode estar presente naturalmente ou ser produzido por bactérias redutoras de sulfato (BRS). Pode causar incrustação por sulfeto de ferro e ser tóxico, se inalado. O O_2 não é encontrado naturalmente na água produzida. Quando a água produzida é trazida à superfície, esse gás é, então, incorporado à sua composição, o que pode causar problemas como torná-la corrosiva e produzir sólidos insolúveis, devido às reações de oxidação. O CO_2 pode estar presente naturalmente e pode ser corrosivo ou se precipitar como CaCO_3 . A remoção de CO_2 e H_2S gera aumento no pH, podendo formar precipitados (Stewart & Arnold, 2011).

2.1.2 Legislação aplicada ao reuso da água

Devido a sua complexidade química, ao grande volume gerado e a falta de conhecimento acerca dos efeitos ecológicos ao longo prazo de descarte, o gerenciamento da água produzida talvez seja um dos assuntos de maior importância de toda indústria petrolífera (Bakke et al., 2013).

Para reuso da água em região semiárida tem-se a resolução COEMA nº 2 de fevereiro de 2017 do Estado do Ceará (Ceará, 2017) que dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 25 de novembro de 2002.

No Artigo 4º da referida resolução adotam-se as seguintes definições de grande importância para a área de reuso:

a) Disposição no solo: tipo de disposição de efluentes tratados localizados em áreas não dotadas de corpo hídrico receptor, bem como provenientes de tratamentos alternativos, com disposição controlada;

b) Ecotoxicidade: efeitos que substâncias efetiva ou potencialmente tóxicas, quando lançadas no meio ambiente, podem causar sobre indivíduos, populações e comunidades de organismos;

c) Reuso direto de água: uso planejado de água de reuso, conduzida ao local de utilização, sem lançamento ou diluição prévia em corpos hídricos superficiais ou subterrâneos;

d) Reuso externo: é o uso de efluentes tratados provenientes das estações administradas por prestadores de serviços de saneamento básico ou terceiros, cujas características permitam sua utilização;

e) Reuso interno: é o uso interno de água de reuso proveniente de atividades realizadas no próprio empreendimento;

f) Testes de ecotoxicidade: métodos utilizados para detectar e avaliar a capacidade de um agente tóxico provocar efeito nocivo, utilizando bioindicadores dos grandes grupos de uma cadeia ecológica;

g) Efluentes não sanitários: todo e qualquer efluente que não se enquadra na definição de efluente sanitário, incluindo os despejos líquidos provenientes das atividades industriais;

h) Efluentes sanitários: denominação genérica para despejos líquidos residenciais, comerciais, águas de infiltração na rede coletora, os quais podem conter parcela de efluentes industriais e efluentes não domésticos;

i) Efluentes tratados: efluentes submetidos a um tratamento parcial ou completo, com a finalidade de conseguir a remoção de substâncias indesejáveis e a estabilização da matéria orgânica.

No Artigo 37 do capítulo III da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017) estão apresentadas as modalidades de reuso da água para o Estado do Ceará:

a) Reuso para fins urbanos: utilização de água de reuso para fins de irrigação paisagística, lavagem de logradouros públicos e veículos, desobstrução de tubulações, construção civil, edificações e combate de incêndio dentro da área urbana;

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

c) Reuso para fins ambientais: utilização de água de reuso para a implantação de projetos de recuperação do meio ambiente;

d) Reuso na aquicultura: utilização de água de reuso para a criação de animais ou para o cultivo de vegetais aquáticos; e

e) Reuso para fins industriais: utilização de reuso em processos, atividades e operações industriais.

Enquanto nos Artigos 38 a 41 da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017), resumidos na Tabela 2, estão apresentados às condições e os padrões de reuso para as modalidades previstas no Artigo 37.

Tabela 2. Condições e padrões de modalidades de reuso da água para o Estado do Ceará

Finalidade do reuso	Artigo	Parâmetros	Valor
Urbano	38	Coliformes termotolerantes	Até 5000 100 mL ⁻¹
		Ovos helmintos	Até 1 ovo L ⁻¹
		Condutividade elétrica	Até 3,0 dS m ⁻¹
		Ph	Entre 6,0 e 8,5
Irrigação paisagística	38 Parag. Único	Coliformes termotolerantes	Até 1000 100 mL ⁻¹
		Ovos helmintos	Até 1 ovo L ⁻¹
		Condutividade elétrica	Até 3,0 dS m ⁻¹
		pH	Entre 6,0 e 8,5
Agrícola e Florestal	39	Coliformes Termotolerantes	Culturas consumidas cruas com parte consumida em direto com a água de irrigação Não detectado
		Demais culturas	Até 1000 100 mL ⁻¹
		Ovos de helmintos	Culturas consumidas cruas com parte consumida em direto com a água de irrigação Não detectado
		Demais culturas	Até 1 ovo L ⁻¹
		Condutividade elétrica	Até 3,0 dS m ⁻¹
		pH	Entre 6,0 e 8,5
		Razão de adsorção de sódio	(15 mmol _c L ⁻¹) ^{0,5}
Ambiental	40	Coliformes termotolerantes	Até 10.000 100 mL ⁻¹
		Ovos helmintos	Até 1 ovo L ⁻¹
		Condutividade elétrica	Até 3,0 dS m ⁻¹
		pH	Entre 6,0 e 8,5
Aquicultura	41	Coliformes termotolerantes	Até 1000 100 mL ⁻¹
		Ovos helmintos	Não detectado
		Condutividade elétrica	Até 3,0 dS m ⁻¹
		pH	Entre 6,0 e 8,0
		Temperatura	Até 40°C

Fonte: Adaptado da Resolução COEMA n° 02/2017 (Ceará, 2017).

De acordo com o Artigo 42 da Resolução COEMA n° 02/2017 (Ceará, 2017), o reuso externo de efluentes não sanitários deverá obedecer aos parâmetros estabelecidos nos Artigos 38 a 41, além de: a) parâmetros estabelecidos na Tabela 3, não contemplados nos Artigos 38 a 41; b) valores máximos admissíveis das substâncias constantes na Tabela 4, de acordo com a tipologia do empreendimento (Tabela 5).

Tabela 3. Padrões de reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará

Parâmetros	Valores permitidos
pH	5,0 a 9,0
Temperatura	40°C
Materiais sedimentáveis	1 mL L ⁻¹
Óleos minerais	20 mg L ⁻¹
Óleos vegetais e gorduras animais	50 mg L ⁻¹
Materiais flutuantes	Ausência
Cor aparente	Ausência
Sólidos suspensos	100 mg L ⁻¹
Coliformes termotolerantes	5000 NMP 100 mL ⁻¹
Sulfeto	1 mg L ⁻¹
Nitrogênio amoniacal total	20 mg L ⁻¹ para pH ≤ 8,0 5 mg L ⁻¹ para pH > 8,0
Sulfato	500 mg L ⁻¹
Demanda química de oxigênio	200 mg L ⁻¹
Oxigênio dissolvido (efluentes de lagoas de estabilização)	3 mg L ⁻¹
Cianeto total	1 mg L ⁻¹
Cianeto livre	0,2 mg L ⁻¹

Fonte: Adaptado da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017).

Verifica-se no Artigo 43 da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017), que a qualidade da água de reuso interno para fins de uso dentro do processo industrial será de responsabilidade do empreendedor. Além disso, o reuso de água não potável proveniente de processos industriais, mesmo que na área do empreendimento, quando ocorrer lançamento direto, deverá obedecer aos padrões de lançamento de reuso externo de acordo com as modalidades previstas nos Artigos 38 a 41.

Tabela 4. Parâmetros específicos para reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará

Parâmetros inorgânicos	Valor máximo (mg L⁻¹)
Alumínio	10
Arsênio total	0,5
Bário total	5,0
Boro total	5,0
Cádmio	0,2
Chumbo	0,5
Cianeto total	1,0
Cobre dissolvido	1,0
Cromo hexavalente	0,1
Estanho	4,0
Ferro solúvel	15,0
Fenóis	0,5
Fluoreto	10,0
Manganês solúvel	1,0
Mercúrio	0,01
Níquel	2,0
Nitrato	10,0
Nitrito	1
Prata	0,1
Selênio	0,05
Zinco total	5,0
Parâmetros orgânicos	Valor máximo (mg L⁻¹)
Benzeno	1,2
Clorofórmio	1,0
Compostos organofosforados em paration carbamatos totais	1,0
Compostos organoclorados não listados (pesticidas, solventes e outros)	0,05
Dicloroetano	1,0
Estireno	0,07
Etilbenzeno	0,84
Tetracloroeto de carbono	1,0
Tricloroetano	1,0
Tolueno	1,2
Xileno	1,6

Fonte: Adaptado da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017).

Tabela 5. Parâmetros específicos por tipologia do empreendimento para reuso externo de efluentes não sanitários no Estado do Ceará

Empreendimentos	Parâmetros específicos
Fabricação de refrigerantes, bebidas alcoólicas (cerveja, chopes, malte)	Selênio
Produção de óleos, gorduras e ceras animais e vegetais	Níquel
Beneficiamento de Castanha	Fenóis totais
Indústria têxtil	Cromo total, cromo hexavalente, chumbo, cádmio, ferro solúvel e zinco
Malharias	Ferro solúvel, zinco e cobre
Confeção com tingimento e, ou lavagem industrial de jeans	Cromo total, cromo hexavalente, chumbo e cádmio
Indústria de beneficiamento de couros e peles	Zinco, cobre, cromo total, cromo hexavalente, cádmio, cianeto total e cianeto Livre
Indústria de beneficiamento do papel e celulose	Zinco, cobre, cromo total e cromo hexavalente
Indústria metalúrgica, indústria mecânica com tratamento de superfície, fabricação de automóveis, caminhonete e utilitários	Cromo total, cromo hexavalente, chumbo, cádmio, cobre, níquel, ferro solúvel, cianeto total e cianeto livre
Fabricação de embalagens metálicas	Chumbo, cádmio, zinco, níquel, ferro solúvel, cobre, cianeto total e cianeto livre
Fabricação de componentes eletrônicos	Chumbo, cádmio, zinco, níquel, ferro solúvel e cobre
Fabricação de semi-jóias	Cobre, ferro solúvel, cádmio, zinco, níquel, chumbo, cianeto total e cianeto livre
Fabricação de produtos de limpeza e de cosméticos (desinfetantes, saneantes, inseticidas e germicidas)	Compostos organofosforados, carbonatos totais, pesticidas e solventes.
Fabricação de produtos farmacêuticos e veterinários	Compostos organofosforados, carbonatos totais, pesticidas, solventes, cianeto total e cianeto livre
Fabricação de agrotóxicos e inseticidas	Zinco, cobre, cádmio, cromo total, níquel, compostos organofosforados, carbonatos totais, pesticidas, solventes, cianeto total e cianeto livre.
Refinaria e Indústria de beneficiamento de petróleo	Ferro solúvel, cádmio, chumbo, cobre, mercúrio, níquel, zinco, benzeno, estireno, tolueno e xileno
Lavagem de veículos e posto de combustíveis com lavagem	Benzeno, etilbenzeno, tolueno e xileno
Na geração de energia elétrica em termoeletrica	Cobre, ferro solúvel, zinco e chumbo
Indústrias de tintas e corantes	Cromo total, cromo hexavalente, chumbo, cádmio, ferro Solúvel, zinco, cianeto total e cianeto Livre

Fonte: Adaptado da Resolução COEMA nº 02/2017 (Ceará, 2017).

2.1.3 Impactos ambientais relacionados ao uso da água produzida para fins agrícolas

O uso de águas residuárias pode causar impactos ambientais positivos e, ou, negativos no sistema solo-planta relacionados as características físicas, químicas e biológicas. No caso da água produzida gerada durante a extração de petróleo, altos índices de constituintes orgânicos e minerais, assim como metais pesados podem estar contidos na mesma (Al-Haleem et al., 2010; Igunnu & Chen, 2014), o que impede o seu descarte no meio ambiente, sendo necessários tratamentos adequados para melhorar sua qualidade.

Devido à quantidade de sais que ela carrega (principalmente Na^+ e Cl^-), a água produzida pode afetar negativamente o solo e o meio ambiente (Köck-Schulmeyer et al., 2011; Travis et al., 2012). A salinidade e a sodicidade do solo podem reduzir a eficiência do uso de carbono pelos microrganismos, com consequentes mudanças na biomassa (Ibekwe et al., 2010). Além disso, podem alterar de forma dramática e irreversível a estrutura do solo.

Níveis elevados de Na^+ causam dispersão da argila e diminuição na infiltração da água, ocasionando possíveis deficiências nutricionais nas plantas, principalmente com relação ao Ca^{2+} e Mg^{2+} que são deslocados pelo alto conteúdo de Na^+ , ou ficam indisponíveis, pois as raízes não conseguem penetrar na subsuperfície (Hillel, 2004).

As concentrações de metais pesados na água produzida também podem criar problemas de toxicidade para as plantas no longo prazo. De fato, alguns metais pesados são adsorvidos ou ligados a outras partículas, reduzindo sua chance de migração ou absorção para as plantas. No entanto, o grau em que diferentes metais são imobilizados no solo é determinado pela composição natural do solo, pH, teor de água e temperatura. Há evidências de acumulação de Cu e Zn no solo usando água produzida para irrigação no Qatar (Ibrahim et al., 2009).

Lopes et al. (2014) avaliaram os atributos biológicos e bioquímicos do solo irrigado com água produzida durante um ciclo de produção do girassol e da mamona. Esses autores observaram mudanças na proliferação de microrganismos e na atividade da nitrogenase, após irrigação com essa água. Ferreira et al. (2015) também observaram mudanças na estrutura da mesofauna do solo, durante dois ciclos de produção das mesmas culturas irrigadas com água produzida.

Sousa et al. (2016) utilizaram água produzida na irrigação de plantas de girassol (*Helianthus annuus L.*) e observaram que a irrigação com água produzida afetou o acúmulo de nutrientes nas plantas. A água produzida tratada por osmose reversa promoveu o acúmulo de Ca, Na, N, P e Mg no tecido vegetal das plantas. Já as plantas irrigadas com água produzida filtrada acumularam maiores teores de Na^+ nas raízes e parte aérea, afetando negativamente a produção de biomassa e de grãos de girassol.

Em estudo semelhante, Weber et al. (2017) constataram que a água produzida tratada por filtração simples em filtros de areia e utilizada na irrigação por gotejamento do girassol ornamental (*Helianthus annuus*), modificou a concentração de sais trocáveis no solo, aumentando o teor de Na⁺ nas camadas rasas, afetando o crescimento vegetativo e a acumulação de nutrientes nas plantas. Enquanto a aplicação de água produzida filtrada e tratada por osmose reversa teve um efeito menor sobre a concentração de nutrientes trocáveis no solo, não sendo capaz de modificar o desempenho agrônômico dos girassóis ornamentais.

2.2 Tipos de gotejadores

Um dos sistemas de irrigação mais apropriados e em notável expansão é o sistema de irrigação por gotejamento, que apresenta vantagens como economia de água e energia, possibilidade de automação e de fertirrigação (Sousa et al., 2011).

Os benefícios alcançados na irrigação e a eficiência dos sistemas de gotejamento têm estimulado os fabricantes a desenvolverem sistemas modernos de gotejamento procurando resolver as limitações dos sistemas mais antigos, principalmente relacionadas ao entupimento dos equipamentos e a variação de vazão.

O gotejador exerce função de grande importância. Segundo Bernardo et al. (2005), gotejadores são peças que dissipam a pressão e permitem a passagem da água da linha lateral para o meio externo, de uma forma controlada (2 a 20 L h⁻¹ a uma pressão média de 100 kPa). Quanto à regulagem de pressão, os gotejadores podem ser classificados em:

- a) Gotejadores não autocompensantes: São sistemas de gotejamento sem mecanismos de regulagem da pressão, ou seja, a uniformidade de emissão de vazão, ao longo da linha lateral, depende da variação de pressão por perda de carga na tubulação, por variação da topografia da área irrigada, pelo coeficiente de variação de fabricação do emissor, do número de emissores por planta, da temperatura da água e do grau de obstrução dos emissores (Wu, 1997; Provenzano & Pumo, 2004).
- b) Gotejadores autocompensantes: São gotejadores dotados de sistema de compensação de pressão que proporciona uma mesma vazão de água, mesmo para diferentes valores de pressão. Operam dentro de uma faixa de variação de pressão proporcionando a mesma vazão de gotejamento. Esses emissores possuem normalmente uma membrana interna que realiza a compensação automática da pressão a ele aplicada; assim, consegue-se a uniformidade da vazão despejada por cada gotejador ao longo do sistema de irrigação (Gomes, 2009).

Os gotejadores autocompensantes foram desenvolvidos com o intuito de melhorar a uniformidade e a eficiência da aplicação de água pela irrigação, bem como permitir aos projetistas a construção de linhas laterais mais longas (Dalri et al., 2015). Nesse tipo de gotejador, a ocorrência de entupimento, entre outros fatores, pode ser devido a danos químicos causados à estrutura da membrana de compensação, ocorrendo um aumento de volume da membrana, reduzindo, assim, a passagem da água no orifício de saída (Carvalho et al., 2016).

2.2 Entupimento de gotejadores aplicando água residuária

Entre os grandes usuários de recursos hídricos, a irrigação é o segmento que mais consome água. Em algumas regiões, o consumo de água por meio da irrigação pode superar 70% do total utilizado (Mantovani et al., 2009).

A região semiárida brasileira caracteriza-se principalmente pela escassez hídrica e variação climática, impondo, dessa forma, a necessidade de busca por estratégias na gestão de recursos e adaptação da sociedade às condições existentes. O crescimento da demanda e as transformações decorrentes de novas práticas baseadas na irrigação e industrialização fomentam conflitos de uso desse escasso recurso, carecendo da implantação de soluções sociais e tecnológicas que possam convergir para um desenvolvimento mais sustentável (Souza Filho, 2011).

Dessa forma, o uso de águas residuárias na agricultura é de grande importância no semiárido nordestino devido ao alívio da demanda e preservação no fornecimento de água para múltiplos propósitos (Hespanhol, 2009), sendo também uma alternativa para o controle da poluição ambiental, além de fornecer água e nutrientes para as culturas (Batista et al., 2011a).

Entre os métodos de irrigação, do ponto de vista ambiental, a irrigação localizada é a mais recomendada para a disposição de águas residuárias no ambiente, devido à alta eficiência de aplicação do efluente e do baixo risco de contaminação do produto agrícola e de operadores no campo (Souza et al., 2011; Rowan et al., 2013).

Como desvantagens, os sistemas de irrigação por gotejamento que operam com águas residuárias apresentam elevada suscetibilidade ao entupimento dos gotejadores (Batista et al., 2008; Liu & Huang, 2009) que oscila com as características intrínsecas do gotejador (Silva et al., 2013) e com a qualidade dos efluentes relacionada aos aspectos físico-químicos e biológicos (Batista et al., 2011a; Batista et al., 2012).

A principal causa de entupimento dos gotejadores consiste na bioincrustação formada nos dispositivos internos dos emissores, afetando, assim, os indicadores de desempenho hidráulico e a eficiência de aplicação do efluente pelo equipamento (Song et al., 2017).

A formação de biofilme dentro dos gotejadores foi relatada por Mesquita et al. (2016a,b) e Vale et al. (2018b) em sistemas de irrigação localizada aplicando percolado de aterro sanitário diluído; por Marques et al. (2016) em unidades gotejadoras aplicando água residuária de laticínios; por Batista et al. (2014a) em unidades gotejadoras operando com água residuária da suinocultura; por Batista et al. (2018) em unidades gotejadoras aplicando água residuária da castanha de caju; por Costa et al. (2017) em sistema de irrigação por gotejamento operando com esgoto doméstico primário; por Nascimento et al. (2016) em unidades gotejadoras aplicando água salina e por Batista et al. (2007) em unidades gotejadoras aplicando água residuária da despulpa dos frutos do cafeeiro. Entretanto, não existem estudos nacionais ou internacionais sobre o entupimento de gotejadores com água produzida.

Tal formação e os processos de crescimento da bioincrustação em gotejadores são ocasionados por múltiplos fatores, incluindo fatores ambientais como a qualidade da água de irrigação (Shelton et al., 2013); características estruturais como tipos de emissores e parâmetros geométricos do trajeto do fluxo (Zhou et al., 2013; Wu et al., 2013; Zhou et al., 2014); características hidráulicas, tais como a velocidade do fluxo e força de cisalhamento da água (Li et al., 2012a); modelos operacionais do sistema como pressão de serviço e frequência de irrigação (Duran-Ros et al., 2009; Elbana et al., 2012; Zhou et al., 2015a) e condições topográficas (Ribeiro et al., 2012).

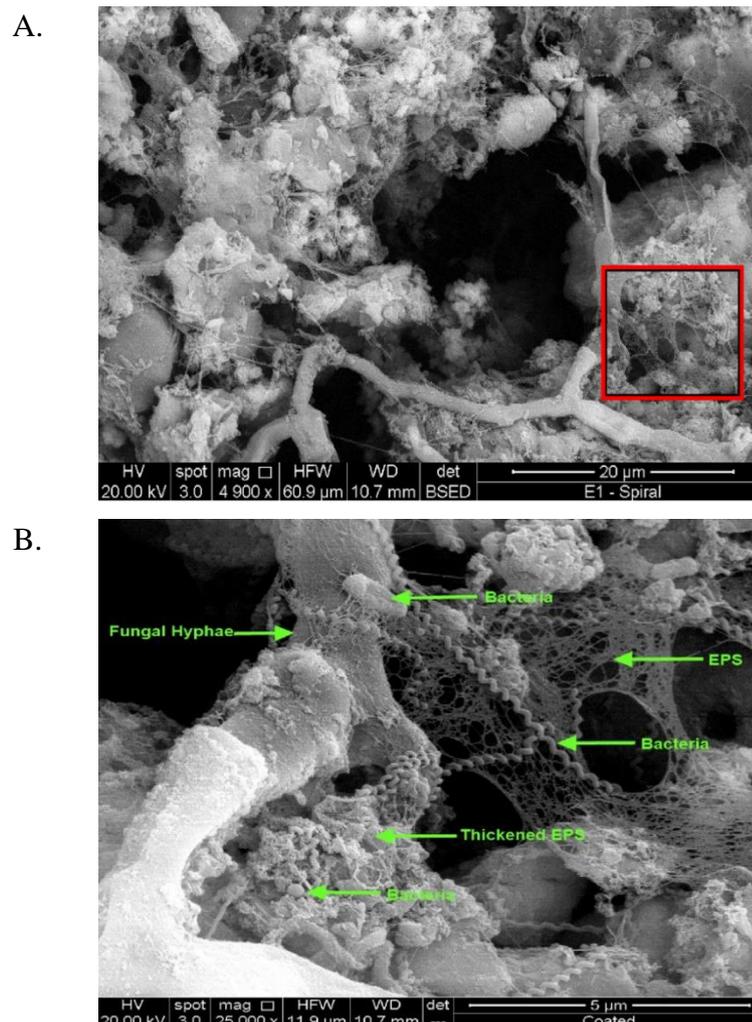
2.2.1 Adesão de colônias isoladas de bactérias nos gotejadores

O entupimento dos emissores de irrigação por gotejamento afeta diretamente a uniformidade da irrigação, a vida útil e o desempenho operacional de todo o sistema (Li et al., 2009; Pei et al., 2014); esta questão torna-se mais séria ao usar água residuária na agricultura. Embora a qualidade da água residuária tratada possa atender aos padrões básicos da irrigação agrícola, esta contém grandes quantidades de microrganismos, partículas sólidas, matéria orgânica e outros (Li et al., 2009; Liu & Huang, 2009). Os microrganismos são especialmente importantes, uma vez que não são apenas componentes críticos dos biofilmes, mas também substâncias poliméricas extracelulares (SPE) pegajosas secretadas (Zhou et al., 2016a,b).

De acordo com Duran-Ros et al. (2009), entre os requisitos de qualidade da água dos sistemas de irrigação que utilizam água residuária, o mais importante é a qualidade microbiana responsável pelo desenvolvimento do biofilme em emissores. Na maioria dos casos, são encontradas bactérias nos biofilmes (Lemon et al., 2008), embora a presença de outros microrganismos também tenha sido identificada. Em geral, os microrganismos correspondem

a cerca de 10% da massa seca do biofilme, enquanto a matriz extracelular pode corresponder a mais de 90% (Flemming & Wingender, 2010).

O padrão organizacional da matriz do biofilme pode ser fundamental para definir como os biofilmes funcionam no caminho de fluxo dos emissores. Oliver et al. (2014) observaram uma estrutura de teias claras (Figura 3A) na matriz celular do biofilme. Essas estruturas funcionavam como ferramentas aéreas, atraindo partículas em suspensão e formando a biomassa. Os microrganismos pareciam vibrantes e se propagavam ativamente dentro do regime celular de biofilmes prematuros, que eventualmente engrossaram a rede porosa (Figura 3B).



Fonte: Oliver et al. (2014).

Figura 3. Matriz celular do biofilme apresentando: série de Substâncias Poliméricas Extracelulares (SPE) espessada (A) e visão ampliada da área de inserção vermelha da imagem anterior mostrando a estrutura da rede da matriz do biofilme (B)

Ainda conforme Oliver et al. (2014), não existe uma razão única para o entupimento de emissores que operam com águas residuárias. Estes autores apontam que o processo de

formação do biofilme é iniciado por secreções bacterianas e, mais tarde, é estruturado por partículas que escapam do mecanismo de filtração dos emissores, como resíduos inorgânicos.

Segundo Albuquerque et al. (2014), a matriz extracelular do biofilme é produzida pelos próprios microrganismos, esta matriz polimérica é conhecida como Substância Polimérica Extracelular (SPE), sendo constituída por polissacarídeos, proteínas, exoenzimas, ácidos nucleicos e lipídios que permitem imobilizar as células do biofilme, mantendo-o coesivo.

A SPE é capaz de manter a estrutura do biofilme estável, enquanto absorve múltiplos materiais na fonte de água para promover o crescimento do biofilme (Zhou et al., 2016b). Assim, os microrganismos e a SPE viscosa são a base do crescimento do biofilme e são influenciados pelo nível populacional e diversidade de microrganismos (Yan et al., 2009).

Li et al. (2012b) consideram que as estruturas complexas de biofilme incluem partículas sólidas, microrganismos (bactérias e fungos) e secreções de SPE. Essa última altamente adaptativa (Kim et al., 2008).

As SPE são excretadas por microrganismos e, por serem viscosas e gelatinosas (Ras et al., 2011), são capazes de aprisionar partículas em suspensão de diferentes tamanhos, ajudando a construir a estrutura da matriz tridimensional que adere ao caminho de fluxo do emissor, resultando em crescimento de biomassa, ocasionando o entupimento (Li et al., 2013a,b; Oliver et al., 2014; Zhou et al., 2015b).

Zhou et al. (2016b) estudaram o processo de crescimento de componentes de biofilme (partículas sólidas, substâncias poliméricas extracelulares e ácidos graxos fosfolipídios) em nove tipos de emissores não autocompensantes de um sistema de irrigação operando com água residuária. Os resultados mostraram que o processo de crescimento do biofilme seguiu a ordem de período adaptativo, período de crescimento rápido e período dinâmico estável. As partículas sólidas, os microrganismos e a matéria orgânica presentes na água, apenas começaram a se conectar ao caminho de fluxo do emissor através das substâncias poliméricas extracelulares (SPE) pegajosas excretadas por microrganismos. Os biofilmes cresceram principalmente na área de estagnação do fluxo devido a menor velocidade.

2.2.2 Combinação dos agentes ocasionadores de obstrução

Uma problemática dos sistemas de irrigação localizada é a obstrução físico-química e microbiológica que ocorre nos gotejadores. Li et al. (2012b) aponta que a existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento, sejam elas de origem orgânica ou precipitados químicos.

De acordo com Niu et al. (2013), a concentração e o tamanho das partículas são os fatores que mais interferem na obstrução. Estes autores constataram que, para as partículas com menos de 0,1 mm de diâmetro, a concentração de sedimentos afetou significativamente o entupimento dos emissores. O nível de obstrução dos emissores aumentou com a elevação da concentração, especialmente quando esta foi superior a 1,25 g L⁻¹, tornando os impactos notáveis.

Os sólidos em suspensão e precipitados químicos nos biofilmes aparecem quando as colônias de bactérias já estão estabelecidas. Todo esse processo é afetado pelas ligações coesas do biofilme e pelas forças de cisalhamento hidrodinâmicas que atuam sobre eles (Oliver et al., 2014).

O entupimento de origem química em emissores se relaciona principalmente à passagem de determinados elementos químicos da forma natural, em que se encontram solúveis na água, para um novo estado de oxidação/redução, de menor solubilidade, com formação de precipitados (Mélo et al., 2008). Estes processos de oxidação/redução envolvem a presença de bactérias, as quais podem, ou não, ser específicas para um determinado elemento.

De acordo com Nakayama et al. (2006), os precipitados químicos resultam de reações dos íons catiônicos cálcio, magnésio e ferro com os íons aniônicos sulfatos, fosfatos, silicatos e hidróxidos (Tabela 6).

Tabela 6. Principais constituintes químicos associados aos problemas de entupimento

Cátion (+)		Ânion (-)		Íons precipitados com ânions
Insolúvel				
Ca	Cálcio	CO ₃	Carbonato	Ca, Mg
Mg	Magnésio	HCO ₃	Bicarbonato	Ca, Mg
Fe	Ferro	PO ₄	Fosfato	Ca, Mg, Fe
Mn	Manganês	OH	Hidróxido	Ca, Mg
		SO ₄	Sulfato	Ca, Mg, Fe, Mn
Solúvel				
Na	Sódio	NO ₃	Nitrato	
K	Potássio	Cl	Cloreto	

Fonte: Adaptado de Nakayama et al. (2006).

Os carbonatos estão entre os sais mais comuns encontrados nas águas de irrigação, principalmente o carbonato de cálcio (CaCO₃), pois ele precipita quando a concentração de bicarbonato excede cerca de 2 mmol_c L⁻¹ e o pH é maior que 7,5. O aumento das temperaturas diminui a solubilidade do carbonato de cálcio, aumentando o potencial para a precipitação. A obstrução de gotejadores devido a precipitação de CaCO₃ é um problema recorrente,

principalmente se houverem elevadas concentrações de íons na água e pH elevado (Liu & Huang, 2009).

Mesmo ocorrendo um processo de filtragem para reter as partículas sólidas, os precipitados químicos ainda podem se formar dentro das tubulações dos sistemas de irrigação por gotejamento, causando a obstrução física. Isso ocorre porque os filtros convencionais de areia, tela e disco não retêm os íons dissolvidos que se combinam para formar os precipitados. Logo, quando esses fatores começam a interferir no desempenho hidráulico dos sistemas, meios de prevenção de obstrução e tratamentos de desobstrução devem ser aplicados para retomar o desempenho adequado do sistema (Ribeiro, 2016).

Busato et al. (2012) comentam que ferro e manganês, em elevados teores, são os principais causadores das obstruções dos emissores em sistemas de irrigação localizada. Estes elementos, ao entrarem em contato com o oxigênio atmosférico ou incorporado à água, oxidam-se, passando para as formas Fe^{3+} e Mn^{4+} , de baixo coeficiente de solubilidade, e precipitam-se facilmente no interior das tubulações e dos emissores, impedindo ou dificultando a passagem normal da água. Ribeiro & Paterniani (2008) encontraram na captação de um sistema de irrigação localizada valor de 2,3 mg L⁻¹ de ferro, e dentro do sistema valores que oscilam de 2,8 a 3,1 mg L⁻¹ devido à precipitação em consequência da oxidação deste elemento.

Já o entupimento de gotejadores ocasionado por agentes biológicos, na maioria das vezes, está associado à formação de mucilagens resultantes da atividade de bactérias, fungos e protozoários. Segundo Carvalho et al. (2015), dentre as principais causas das obstruções biológicas está a presença de pequenos organismos aquáticos, como larvas, algas, fungos e bactérias que passam através dos filtros e se desenvolvem formando colônias no interior das tubulações, cujo crescimento é favorecido por condições de repouso, iluminação, temperatura e nutrientes, como nitrogênio e fósforo.

Estão apresentadas, na Tabela 7, as características física, químicas e biológica das águas residuárias e sua relação com o risco de obstrução de gotejadores conforme classificação proposta por Capra & Scicolone (1998) e Nakayama et al. (2006).

Tabela 7. Características física, químicas e biológica das águas residuárias que representam risco de obstrução de gotejadores

Tipo de problema	Risco de entupimento					
	Menor		Moderado		Severo	
	a	b	a	b	a	b
Físico						
SS (mg L ⁻¹)	< 50	< 200	50-100	200-400	> 100	> 400
Químico						
pH	< 7,0	n.c.	7,0-7,5	n.c.	> 7,5	n.c.
CE (dS m ⁻¹)	< 1,0	n.c.	1,0-4,5	n.c.	> 4,5	n.c.
SD (mg L ⁻¹)	< 500	< 625	500-2.000	625-2.900	> 2.000	> 2.900
Mn (mg L ⁻¹)	< 0,1	< 0,7	0,1 - 1,5	0,7 - 1,0	> 1,5	> 1,0
Fe (mg L ⁻¹)	< 0,2	< 0,5	0,2 - 1,5	0,5 - 1,2	> 1,5	> 1,2
H ₂ S (mg L ⁻¹)	< 0,2	n.c.	0,2 - 2,0	n.c.	> 2,0	n.c.
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	n.c.	< 12,5	n.c.	12,5 - 22,5	n.c.	> 22,5
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	n.c.	< 2,1	n.c.	2,1 - 7,3	n.c.	> 7,3
Biológico						
PB (UFC mL ⁻¹)	< 10.000	n.c.	10.000-50.000	n.c.	> 50.000	n.c.

Nota: SS - sólidos suspensos; pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica; SD - sólidos dissolvidos; Mn - manganês; Fe - ferro; H₂S - sulfeto de hidrogênio; Ca²⁺ - cálcio; Mg²⁺ - magnésio e PB - população bacteriana. (a) Segundo Nakayama et al. (2006) e (b) De acordo com Capra & Scicolone (1998); n.c. - não classificado e UFC - unidades formadoras de colônias.

Fonte: Adaptado de Capra & Scicolone (1998) e Nakayama et al. (2006).

A matriz da bioincrustação, formada no interior dos gotejadores e das linhas laterais, foi estudada nos últimos anos por diversos autores (Batista et al., 2008; Liu & Huang, 2009; Yan et al., 2009; Li et al., 2011; Silva et al., 2013; Szekut et al., 2015).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica importante que possibilita a caracterização visual de agentes ocasionadores de entupimento em gotejadores, com grande riqueza de detalhes (Marques, 2016).

No trabalho desenvolvido por Dazhuang et al. (2009), a análise por microscopia eletrônica de varredura (MEV) revelou, na matriz do biofilme de gotejadores que operaram com água residuária, partículas aderidas em polissacarídeos extracelulares, além, ainda, da presença de sedimentos formados no labirinto dos emissores após 360 h de irrigação com água residuária. Foi constatado, também, que o tipo de emissor exerce influência na estrutura e diversidade da comunidade biológica presente no biofilme.

Semelhantemente, Szekut et al. (2015) em estudo com gotejadores aplicando água residuária doméstica tratada durante 1188 h, identificaram pela MEV biofilme formado no labirinto dos emissores ensaiados. Enquanto, Eroglu et al. (2012), também utilizando MEV detectaram em gotejadores obstruídos a presença de carbonato de cálcio.

2.2.3 Características estruturais e hidráulicas de gotejadores que interferem no entupimento

O desempenho hidráulico de emissores está correlacionado com parâmetros estruturais do labirinto, particularmente o número de unidades trapezoidais (dentadura) e variáveis de altura (Al-Amoud et al., 2014).

Conforme Wu et al. (2013), o desempenho anti-obstrução, que apresenta relação direta com a estrutura geométrica, é um índice indispensável para avaliar as propriedades do emissor, sendo comumente caracterizado pela função entre a estrutura de passagem e o fluido (características de distribuição de velocidade). Estes autores selecionaram diferentes seções transversais da mesma unidade estrutural para analisar as características de distribuição de velocidade no emissor e constataram que, a área ao redor do caminho de fluxo é a posição onde o entupimento acontece mais facilmente, devido à baixa velocidade.

Abordagens multidisciplinares (Qingsong et al., 2008; Zhang et al., 2010; Li et al., 2011) sugerem que o projeto de emissores com regime de fluxo turbulento ofereça algum grau de proteção contra o entupimento. Um estudo mais recente de Li et al. (2013a) também afirmou que os modelos turbulentos de emissores possuem mecanismos eficazes de anti-obstrução.

Oliver et al. (2014) investigaram o processo de bioincrustação em três tipos de emissores autocompensantes, com diferentes projetos de labirinto. Observou-se que, devido a bioincrustação nos labirintos, a vazão para todos os tipos de emissores diminuiu gradualmente, ao longo do tempo. No entanto, os emissores Netafim techline e Toro drip-in PC foram mais suscetíveis ao entupimento do que o Rainbird driptube. Observou-se que os emissores com a menor taxa de fluxo (Netafim techline - $1,6 \text{ L h}^{-1}$) apresentaram menor velocidade média e menor tensão de cisalhamento, isso explica por que o crescimento do biofilme foi consistentemente elevado nesse tipo de emissor. Em contrapartida, os emissores com maior taxa de fluxo (Toro drip-in PC - $2,0 \text{ L h}^{-1}$ e Rainbird driptube - $2,3 \text{ L h}^{-1}$) enfrentaram forças de cisalhamento mais fortes dentro das linhas laterais, ao longo do período experimental, sendo o crescimento mais lento da biomassa microbiana nesses dois emissores, atribuído às condições relativamente turbulentas criadas pelas forças de cisalhamento.

Estes autores constataram, ainda, que os emissores com seção de entrada de fluxo mais longa (Netafim techline - 15,35 mm) tendem a acumular mais biomassa microbiana, em comparação àqueles com seção de entrada mais curta (Toro drip-in PC - 4,21 mm e Rainbird driptube - 8,11 mm). Se a seção de entrada é mais longa e os dentes do labirinto são estreitamente espaçados, como no caso do Netafim techline, então maior será a área superficial que entra em contato com a água, criando maior fricção e resultando em menor velocidade média na entrada. Esta baixa velocidade média sempre se transforma em uma tensão de cisalhamento mais fraca,

ocasionando um maior crescimento da biomassa microbiana na entrada do emissor. Por outro lado, o menor crescimento do biofilme em emissores com seção de entrada mais curta e aletas mais largas (Rainbird driptube) é atribuído às forças de cisalhamento mais fortes na entrada do emissor. O encurtamento da seção de entrada com espaçamento mais largo entre os dentes pode, portanto, proporcionar melhor desempenho anti-obstrução em emissores autocompensantes (Oliver et al., 2014).

As diferentes dimensões dentro do labirinto do emissor tendem a produzir várias taxas de descarga dependendo da pressão da água (Wei et al., 2007; Zhang et al., 2011). Alterações na magnitude da pressão de serviço podem interferir no processo de entupimento de gotejadores, devido à mudança no regime de escoamento, acarretando impactos na deposição de sedimentos e formação de biofilme. No trabalho de Silva et al. (2016), com unidades gotejadoras aplicando águas residuária da castanha de caju, durante 160 h, foi evidenciada a minimização na formação de biofilme com o aumento na pressão de serviço, onde a pressão de 140 kPa se destacou na prevenção do entupimento dos emissores ensaiados.

O fenômeno de obstrução é observado tanto nos gotejadores autocompensantes quanto nos gotejadores não autocompensantes (Capra & Scicolone, 2007). Vale et al. (2018b) constataram que os gotejadores não autocompensantes apresentaram maiores níveis de entupimento em relação ao gotejador autocompensantes quando da aplicação de percolado de aterro sanitário diluído.

Diferentemente dos resultados apresentados por Gamri et al. (2014), onde os emissores autocompensantes foram mais sensíveis ao entupimento do que os emissores não autocompensantes. Oliver et al. (2014) relataram que o problema é mais complexo nos emissores autocompensantes, onde o caminho do fluxo é protegido por um diafragma que resiste a qualquer alteração no regime de fluxo.

2.3 Modelos empíricos aplicados ao entupimento de gotejadores

A manutenção de elevada uniformidade de aplicação e distribuição de água nos sistemas de irrigação por gotejamento torna-se fundamental para a irrigação eficiente e, conseqüentemente, melhor aproveitamento dos recursos hídricos e redução dos custos (Ribeiro et al., 2012). O grande problema associado à utilização de águas residuárias em sistemas de irrigação localizada, consiste na redução de vazão devido ao entupimento parcial ou total dos gotejadores, afetando a uniformidade de aplicação de água, e conseqüentemente a eficiência do sistema de irrigação localizado (Batista et al., 2014a; Marques et al., 2016; Mesquita et al., 2016a,b).

Modelos empíricos relacionados ao desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento com as variáveis tempo de operação (Batista et al., 2016), qualidade das águas residuárias (Vale et al., 2018b) e características intrínsecas dos gotejadores (Oliver et al., 2014) auxilia na escolha da técnica, do tempo de uso e de medidas preventivas e corretivas relacionadas às obstruções dos gotejadores na aplicação de águas residuárias.

2.3.1 Indicadores de desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento

Para a avaliação do desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento aplicando águas residuárias, vários indicadores podem ser empregados na detecção dos níveis de obstrução de gotejadores. Entre as equações mais utilizadas, destacam-se:

- Equação vazão em função da pressão

Através da Equação 1 podem ser obtidas as curvas de vazão em função da pressão para cada modelo de gotejador. Essas curvas caracterizam o comportamento da vazão do emissor em função da pressão e do regime de escoamento caracterizado pelo expoente de descarga “x” (Ahmed et al., 2007; Demir, 2007), de modo que, para $x < 1$, o regime de escoamento é caracterizado como turbulento (Pizarro Cabello, 1990).

$$q = k \cdot h^x \tag{1}$$

Em que:

q - vazão ($L h^{-1}$);

k - coeficiente de proporcionalidade;

h - pressão de serviço (kPa); e

x - expoente de descarga.

- Vazão dos gotejadores (Q)

Do ponto de vista prático, a vazão média de emissores pode ser considerada um bom parâmetro para avaliar o processo de entupimento (desempenho hidráulico), sendo utilizado em todos os trabalhos pertinentes (Cararo et al., 2006) e calculada por meio da Equação 2.

$$Q = \frac{\text{Vol}}{1000 \cdot \text{tem}} \cdot 60 \quad (2)$$

Em que:

Q - vazão do emissor, L h⁻¹;

Vol - volume de efluente coletado, mL; e

tem - tempo de coleta do efluente, min.

Batista et al. (2011b) constataram reduções de 62, 22 e 61% na vazão dos gotejadores dos conjuntos de irrigação operando com esgotos domésticos preliminar, secundário e terciário, respectivamente.

- Vazão relativa (QR)

A vazão relativa é obtida conforme a Equação 3, dividindo-se a vazão estudada em determinado instante pela vazão inicial do emissor, sendo classificada conforme adaptação de Capra & Scicolone (1998) em alta (maior que 0,39), média (entre 0,21 e 0,39) e baixa (menor que 0,21).

$$QR = \frac{q_a}{q_i} \quad (3)$$

Em que:

QR - vazão relativa;

q_a - vazão atual, L h⁻¹; e

q_i - vazão inicial, L h⁻¹.

Segundo Cararo et al. (2006) valores de QR iguais a 1 (QR = 1,00) evidenciam ausência de entupimento nos gotejadores. Valores de QR inferiores a 1 (QR < 1,00) indicam obstrução acarretando redução na vazão dos gotejadores, pois ocorre o estreitamento das dimensões internas do emissor com biofilme, resultando na redução da área de seção transversal de escoamento, como evidenciado nos estudos de Batista et al. (2013a) e Silva et al. (2013). Já valores de QR maiores que 1,00 (QR > 1,00) indicam que houve um aumento de vazão que pode ocorrer em virtude de danos causados nos orifícios dos gotejadores, provavelmente, devido ao aquecimento do efluente dentro dos emissores, nos momentos em que o sistema não

estava operando, resultando em dilatação dos componentes dos gotejadores (Cararo et al., 2006).

- Coeficiente de redução da vazão relativa (RQR)

O coeficiente de redução da vazão relativa fornece uma medida do desvio da condição inicial de vazão dos gotejadores por meio da Equação 4 (Liu & Huang, 2009), expressando com precisão os níveis de obstrução dos emissores que aplicam água residuária.

$$RQR = 100 \cdot \left(\frac{q_i - q_a}{q_i} \right) \quad (4)$$

Em que:

RQR - coeficiente de redução da vazão relativa, %;

q_i - vazão inicial, L h⁻¹; e

q_a - vazão atual, L h⁻¹.

Capra & Scicolone (1998) sugerem a seguinte classificação para o RQR, o qual expressa o grau de entupimento do gotejador: alto (maior que 79%), médio (entre 61 a 79%) e baixo (menor que 61%).

- Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Keller & Karmeli (1975) sugerem a utilização da Equação 5, que compara a média de 25% dos menores valores de vazões observadas com a média total das vazões para a determinação da uniformidade de aplicação de água de sistemas de irrigação por gotejamento.

$$CUD = 100 \cdot \frac{q_{25\%}}{\bar{q}} \quad (5)$$

Em que:

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

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

\bar{q} - vazão média dos gotejadores, L h⁻¹.

Merriam & Keller (1978) apresentaram o seguinte critério geral para interpretação dos valores de CUD, para sistemas que estejam em operação por um ou mais anos: maior que 90%, excelente; entre 80 e 90%, bom; 70 e 80%, regular; menor que 70%, ruim.

- Coeficiente de variação de vazão (CVQ)

A variação de vazão entre os gotejadores pode ser avaliada através da Equação 6. A norma ASAE EP 405 (ASABE, 2008) sugere a seguinte classificação para os valores do CVQ: menor que 10%, bom; entre 10 e 20%, razoável; e maior que 20%, inaceitável.

$$CVQ = 100 \cdot \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2}{n_e - 1}}}{\bar{q}} \quad (6)$$

Em que:

CVQ - coeficiente de variação da vazão, %;

q_i - vazão de cada gotejador, L h⁻¹;

\bar{q} - vazão média dos gotejadores, L h⁻¹; e

n_e - número de gotejadores avaliados.

- Coeficiente de uniformidade estatística (Us)

De acordo com Bralts et al. (1987), outro coeficiente utilizado para expressar a uniformidade de aplicação de água em um sistema de irrigação localizada é a uniformidade estatística. O conceito de uniformidade estatística (Us) é baseado no coeficiente de variação (CVQ) das vazões dos emissores, que por sua vez é obtido a partir das estimativas da média e do desvio padrão, conforme Equação 7.

$$Us = 100 \cdot (1 - CVQ) \quad (7)$$

Em que:

Us - coeficiente de uniformidade estatístico de aplicação de efluente, %; e

CVQ - coeficiente de variação da vazão, %.

Mantovani (2002) classifica os valores de uniformidade estatística (Us) da seguinte forma: menor que 60%, inaceitável; entre 60 e 70%, ruim; entre 70 e 80%, razoável; entre 80 e 90%, bom; e maior que 90%, excelente.

Souza & Astoni (2012) constataram redução no coeficiente estatístico de uniformidade (Us) de 54, 24 e 59%, respectivamente, para os sistemas de irrigação operando com esgoto sanitário submetido a três níveis de tratamento (preliminar, secundário e terciário), após 500 horas de operação do sistema.

2.3.2 Avaliação em função do manejo operacional do sistema de irrigação

Batista et al. (2016) desenvolveram modelos empíricos que relacionam o tempo de operação (T) das unidades de irrigação por gotejamento, com as variáveis CVQ (Equação 8), Us (Equação 9) e RQR (Equação 10), apresentando coeficientes de determinação (R^2) iguais a 0,99, 0,99 e 0,97, respectivamente. Os modelos abaixo referem-se ao gotejador G1 (2,00 L h⁻¹) sob pressão de serviço de 70 kPa.

$$CVQ = 5,290 - 0,281 T + 0,0452 T^2 \quad (8)$$

$$Us = 94,710 + 0,281 T - 0,0452 T^2 \quad (9)$$

$$RQR = 98,857 + 4,126 T^{0,5} - 0,658 \quad (10)$$

Em que:

T - tempo de operação das unidades de irrigação, h.

Vale et al. (2018b) observaram que os modelos de regressão linear e raiz quadrada foram os que melhor representaram a redução da uniformidade de aplicação do efluente em função do tempo de operação das unidades gotejadores que operaram com percolado de aterro sanitário diluído. As Equações 11, 12 e 13 estão relacionadas aos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC), de uniformidade de distribuição (CUD) e de uniformidade estatística (Us), respectivamente, para o gotejador Plastro Hydrodrip Super (1,65 L h⁻¹) submetido à pressão de serviço de 70 kPa; enquanto as Equações 14, 15 e 16 referem-se ao gotejador Netafim Tiran (2,0 L h⁻¹) submetido à pressão de serviço de 210 kPa.

$$CUC = 97,99 - 0,027 T \quad (11)$$

$$\text{CUD} = 97,81 - 0,063 T \quad (12)$$

$$U_s = 97,12 - 0,036 T \quad (13)$$

$$\text{CUC} = 96,370 + 0,69 T^{0,5} - 0,064 T \quad (14)$$

$$\text{CUD} = 92,03 + 1,69 T^{0,5} - 0,15 T \quad (15)$$

$$U_s = 94,75 + 0,97 T^{0,5} - 0,091 T \quad (16)$$

Em que:

T - tempo de operação das unidades de irrigação, h.

Em estudo realizado por Silva et al. (2016), com unidades gotejadoras dotadas de três tipos de emissores aplicando água residuária da castanha de caju, constatou-se que para os dados do coeficiente de variação de vazão (CVQ) e do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) em função do tempo de operação, 17, 17 e 8% e 17, 17 e 0% dos modelos de regressão ajustados foram o raiz quadrada, o linear e o quadrático, respectivamente. Na relação de CVQ e CUD com pressões de serviço, 11, 22 e 0% e 0, 22 e 11% dos modelos de regressão ajustados foram o raiz quadrada, o linear e o quadrático, respectivamente.

2.3.3 Avaliação em função da qualidade do efluente

Ao avaliar o desempenho hidráulico de três modelos de gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído em água, Vale et al. (2018b) desenvolveram relações lineares as quais revelaram que os teores de cálcio e os níveis populacionais de coliformes totais foram as características do percolado de aterro sanitário diluído que mais interferiram no processo de obstrução dos gotejadores. As Equações 17 e 18 foram ajustadas aos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD), respectivamente, para o gotejador Plastro Hydrodrip Super (1,65 L h⁻¹) operando sob pressão de serviço de 140 kPa.

$$\text{CUC} = 101,66 - 0,31 \text{Ca}^{2+} - 1,51 \text{CT} \quad (17)$$

$$\text{CUD} = 100,61 - 4,20 \text{CT} \quad (18)$$

Em que:

Ca^{2+} - cálcio, $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$;

CT - coliformes totais, NMP 100 mL^{-1}

Silva et al. (2016), estudando o desempenho de gotejadores operando com água residuária da castanha de caju, encontraram modelos de regressões lineares múltiplas dos coeficientes de variação de vazão (CVQ) e uniformidade de distribuição (CUD) em função das características físico-químicas e microbiológicas da água residuária. Esses autores constataram que, o teor de sólidos dissolvidos foi a característica que mais interferiu nos valores dos coeficientes das unidades gotejadoras D1 - 1,65 L h^{-1} (Equações 19 e 20) e D3 - 4,00 L h^{-1} (Equações 21 e 22), todas operando sob a pressão de serviço de 70 kPa.

$$\text{CVQ} = - 144,34 + 4,34 \text{Mg}^{2+} + 0,053 \text{SD} + 0,0064 \text{CT} + 26,74 \text{Fe} + 31,05 \text{Mn} \quad (19)$$

$$\text{CUD} = 237,82 - 5,72 \text{Mg}^{2+} - 0,057 \text{SD} - 0,016 \text{CT} \quad (20)$$

$$\text{CVQ} = - 28,28 + 0,015 \text{SD} \quad (21)$$

$$\text{CUD} = 135,52 - 0,018 \text{SD} \quad (22)$$

Em que:

SD - sólidos dissolvidos, mg L^{-1} ;

Fe - ferro total, mg L^{-1} ;

Mn - manganês total, mg L^{-1} ;

Mg^{2+} - magnésio, $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$;

CT - coliformes totais, NMP 100 mL^{-1}

2.3.4 Avaliação em função da comunidade microbiana do emissor

Zhou et al. (2017) estudaram os efeitos da variação da comunidade microbiana na bioincrustação em emissores de irrigação por gotejamento utilizando água residuária. Para isso, os ácidos graxos fosfolipídicos (PLFAs) em biofilme foram utilizados como bioindicador da comunidade microbiana dentro dos emissores, avaliando-se a variação dinâmica dos microrganismos e seu efeito no processo de entupimento.

A Equação 23 foi utilizada para ajustar as relações entre o grau de obstrução do emissor e os PLFAs do biofilme:

$$CD = \frac{a}{(\ln PLFAs - b)} \quad (23)$$

Em que:

CD - grau de obstrução do emissor (%);

PLFAs - conteúdo de ácidos graxos fosfolipídicos de biofilme por unidade de área dentro de diferentes tipos de emissores ($\mu\text{g m}^{-2}$);

a e b - parâmetros de ajuste.

Constatou-se que o processo de crescimento dinâmico de PLFAs em biofilmes, por unidade de área, no caminho do fluxo do emissor, afetou diretamente o entupimento. Na fase de operação preliminar, o grau de obstrução do emissor (CD) foi inferior a 10-20%, mas a quantidade de PLFAs de biofilme acelerou o grau de obstrução do emissor durante esse período. Pouco depois, o CD atingiu 20-40%, o impacto do crescimento de PLFAs de biofilme no entupimento do emissor foi relativamente mais fraco, já que o grau de obstrução do emissor aumentou relativamente devagar. Em seguida, o CD excedeu 40%, o impacto mencionado acima tornou-se extremamente significativo e o efeito influente aumentou. Nesta fase, um pequeno aumento de PLFAs levaria à uma obstrução de emissor mais séria (Zhou et al., 2017).

Avaliando a relação quantitativa entre os componentes do biofilme e o entupimento de emissores que operaram com água residuária, Zhou et al. (2013) constataram que os ácidos graxos fosfolipídicos (PLFAs) do biofilme, dentro dos emissores, apresentaram correlação linear negativa para os coeficientes de redução da vazão relativa (RQR) e de uniformidade (CU), com R^2 iguais a 0,93 e 0,86, respectivamente, indicando diminuição linear desses indicadores com o aumento nos PLFAs do biofilme. As Equações 24 e 25 se referem aos modelos de regressão desenvolvidos pelos autores.

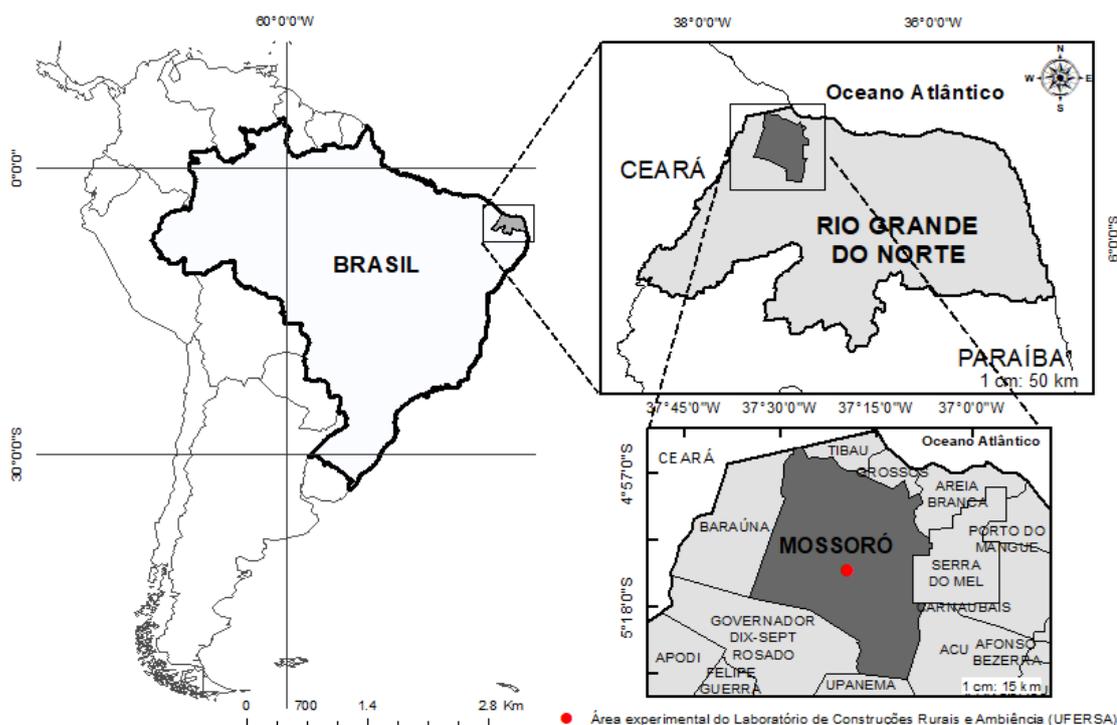
$$PFLAs = - 0,012 RQR + 1,394 \quad (24)$$

$$PFLAs = - 0,009 CU + 1,08 \quad (25)$$

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área experimental e período de estudo

O presente trabalho foi conduzido em duas etapas. A primeira etapa ocorreu no período de 26 de agosto a 05 de outubro de 2018, enquanto a segunda compreendeu o período de 29 de outubro a 05 de novembro de 2018, ambas realizadas na área experimental do Laboratório de Construções Rurais e Ambiente do Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais (DECAM) do Centro de Engenharias (CE), localizado no Campus Leste da Universidade Federal Rural do Semi-Árido (UFERSA), em Mossoró-RN sob as coordenadas geográficas 5°12'13,14" de latitude sul e 37°19'26,93" de longitude oeste, com altitude média de 18 m (Figura 4).



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 4. Localização da área experimental

O clima da região onde está inserida a área experimental, segundo a classificação de Köppen, é do tipo BSh, sendo seco, muito quente e com estação chuvosa no verão atrasando-se para o outono, tendo precipitação pluviométrica bastante irregular, com média anual de 794 mm; temperatura média anual de 26,5 °C; umidade relativa do ar média de 68,9%; insolação média diária de 7,83 horas e anual de 2.771,27 horas de brilho solar e velocidade média do vento de 0,84 m s⁻¹, durante um período histórico de 30 anos (Álvares et al., 2013).

3.2 Coleta e transporte do efluente utilizado no experimento

A água produzida do petróleo utilizada no experimento foi oriunda de uma empresa que explora petróleo no solo da Bacia Potiguar, próximo ao município de Jucuri-RN, zona rural do município de Mossoró.

As coletas foram realizadas por meio da captação da água produzida diretamente do reservatório localizado no campo de exploração de petróleo em solo, sendo posteriormente transferida para uma caixa impermeabilizada de fibra de vidro com capacidade para 1000 L. Em seguida, era transportada até o local do experimento na UFERSA, sendo depositada em reservatórios de polietileno. Esse procedimento repetia-se a cada 20 dias, para repor, devido a evaporação, a quantidade de resíduo líquido utilizada no decorrer do experimento, totalizando três coletas ao longo do período experimental.

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

3.3 Montagem das plataformas de ensaios

Para a realização dos ensaios foram montadas cinco bancadas experimentais de 8,00 m² (1,00 m de largura por 8,00 m de comprimento), constituídas de uma base de madeira para a sustentação de telhas de fibrocimento onduladas. As telhas foram instaladas com declividade de 2,50% para possibilitar a recirculação do efluente. À jusante de cada bancada foi instalado um reservatório de 0,31 m³ acoplado a um sistema de irrigação por gotejamento composto por um conjunto motobomba de 0,50 cv, um filtro de tela com aberturas de 130 µm, um registro de gaveta, um ponto para coleta de amostras do efluente, um manômetro analógico de glicerina da marca GE CI2.5 (graduado de 0 a 400 kPa), uma linha principal de 32 mm, uma linha de derivação de 50 mm e nove linhas laterais com 8,00 m de comprimento (Figura 5).

A.



B.



C.



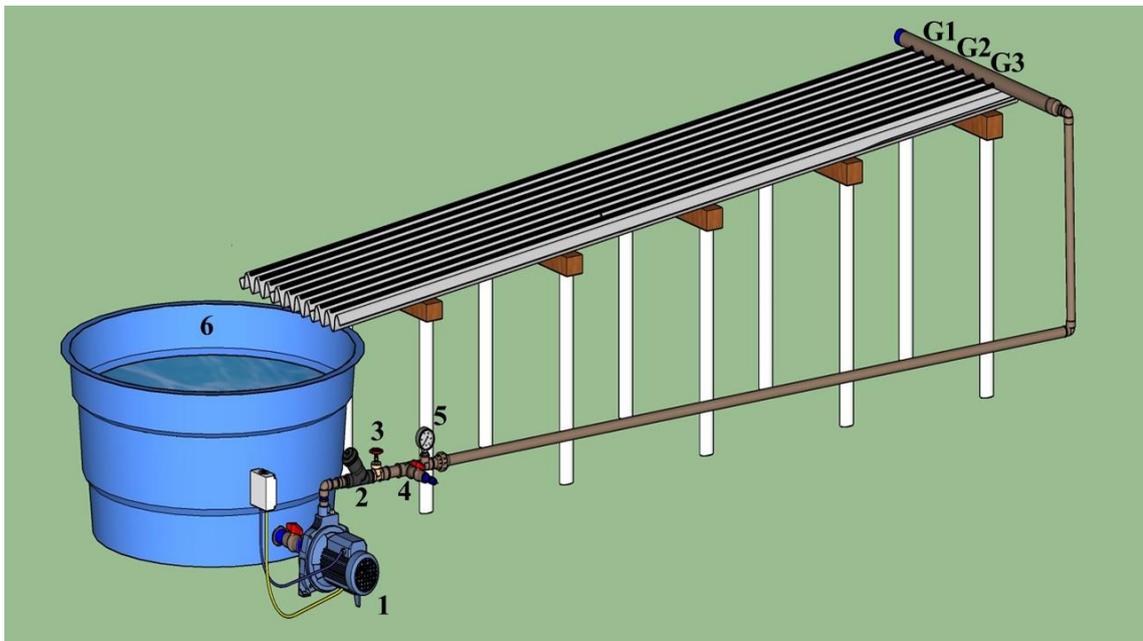
D.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 5. Vista geral de uma das cinco bancadas experimentais (A) composta por linha de derivação e nove linhas laterais (B), conjunto motobomba de 0,5 cv, filtro de tela, registro de gaveta, ponto para coleta de amostras, manômetro analógico (C) e reservatório de 0,31 m³ (D)

O sistema de irrigação por gotejamento foi dividido em três unidades gotejadoras, distribuídas na bancada experimental de forma inteiramente casualizada, seguindo as recomendações de Marques et al. (2016) e Mesquita et al. (2016a). Cada unidade gotejadora constou de três linhas laterais de 8,00 m de comprimento de um único fabricante de emissores, onde em cada linha lateral foram selecionados 16 emissores equidistantes entre si, para a avaliação da uniformidade de distribuição de efluente. Na Figura 6 está apresentada uma esquematização da bancada experimental elaborada no Google SketchUp Free (2018).



Nota: 1 - Bomba centrífuga, 2 - Filtro de tela, 3 - Registro de gaveta, 4 - Ponto para coleta de amostras do efluente, 5 - Manômetro, 6 - reservatório para armazenamento da água produzida tratada diluída.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 6. Esquema da bancada experimental elaborada no Google SketchUp Free (2018)

Os tubos gotejadores utilizados foram do tipo labirinto, não autocompensantes. Este tipo de emissor é susceptível ao entupimento pelo longo percurso percorrido pelo fluido, realizando perdas de energia no labirinto a fim de uniformizar a descarga.

Na Tabela 8 estão apresentadas as especificações técnicas, obtidas de catálogos técnicos fornecidos pelos fabricantes e medidas com auxílio de um paquímetro digital, bem como as imagens dos gotejadores não autocompensantes utilizados nos ensaios experimentais.

Tabela 8. Especificações técnicas e imagens dos gotejadores não autocompensantes ensaiados por 160 h com diluições de água produzida tratada

Fabricante	Q* (L h ⁻¹)	k*	x*	A* (mm ²)	L* (mm)	CVf* (%)	P* (kPa)	EE* (m)	Imagens dos gotejadores
Netafim Super Typhoon - G1	1,60	0,53	0,48	34,0	23	± 7	60 - 100	0,30	
Netafim Streamline - G2	1,60	0,57	0,45	17,0	13	± 7	65 - 100	0,30	
NaanDanJain TalDrip - G3	1,70	0,56	0,46	6,0**	44**	± 5	50 - 300	0,20	

Nota: Q - Vazão nominal; k - coeficiente de vazão; x - expoente da vazão que caracteriza o regime de escoamento; A - Área de filtragem; L - Comprimento do labirinto; CVf - Coeficiente de variação de fabricação; P - Faixa de pressão recomendada; e EE - Espaçamento entre emissores. * Informações técnicas extraídas de catálogos dos fabricantes. ** Informações obtidas com paquímetro digital com precisão de 0,01 mm.

Fonte: Adaptado de Marques et al. (2016).

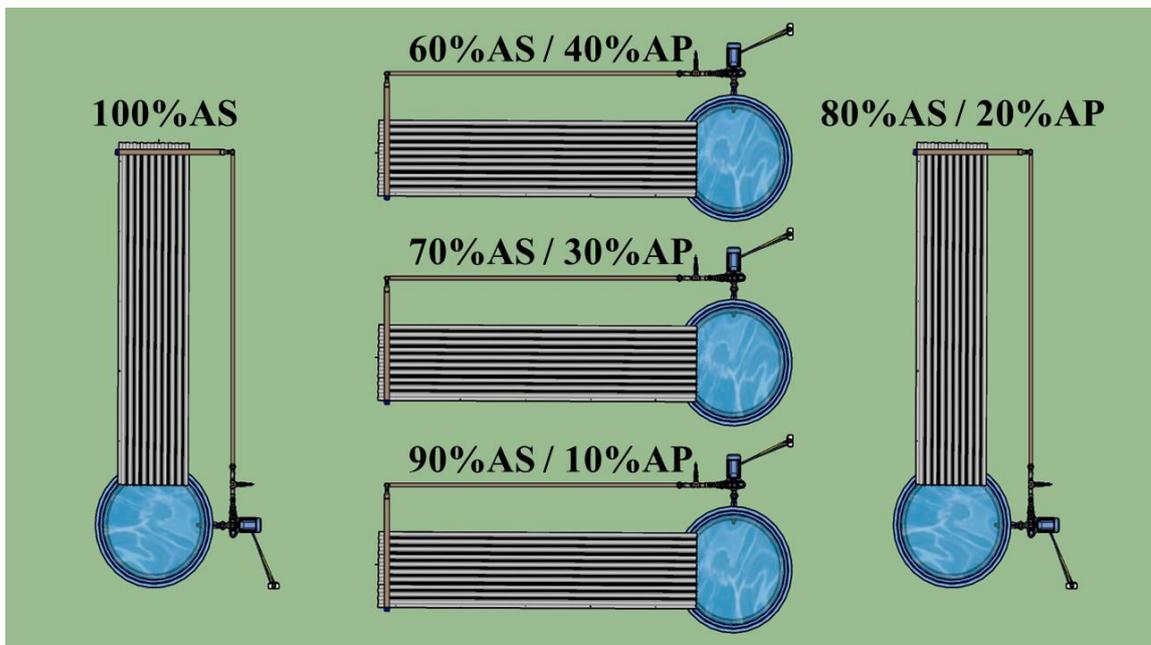
3.4 Tratamentos utilizados

Os tratamentos foram definidos de modo que houvesse um tratamento operando apenas com água subterrânea (T1), enquanto os demais (T2, T3, T4 e T5) consistiram em distintas diluições de água produzida tratada (AP) em água subterrânea (AS).

As diluições foram realizadas com baldes graduados e armazenadas nos reservatórios à jusante de cada bancada, correspondentes a cada tratamento. Um esquema do delineamento experimental é apresentado na Figura 7.

Dessa forma, foram avaliados os seguintes tratamentos:

- a) T1 - 100% de AS (Testemunha);
- b) T2 - 90% de AS e 10% de AP;
- c) T3 - 80% de AS e 20% de AP;
- d) T4 - 70% de AS e 30% de AP; e
- e) T5 - 60% de AS e 40% de AP.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 7. Esquema do delineamento experimental utilizado na condução dos ensaios experimentais

Devido a composição química da água produzida tratada (AP), a mesma foi diluída em água subterrânea (AS), sendo os tratamentos baseados nos resultados encontrados por Costa (2018), em que o tratamento T2 (75% de água de abastecimento e 25% de água produzida tratada) apresentou os melhores efeitos sobre a irrigação do girassol; e em estudos que detectaram alterações na dinâmica de obstrução dos gotejadores, em função da adição de água de abastecimento em sistemas que operaram com águas residuárias de origens distintas (Batista et al., 2014b,c; Costa, 2016; Costa et al., 2017).

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

3.5 Condução dos experimentos

Para atender aos objetivos do trabalho, foram conduzidos dois experimentos. No primeiro determinou-se o desempenho hidráulico das unidades gotejadoras que operaram com distintas diluições de AP em AS, e posterior detecção do nível de entupimento. O segundo permitiu obter as curvas vazão em função da pressão de serviço dos três modelos de gotejadores não autocompensantes que operaram com as diluições.

3.5.1 Experimento I: Desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida em água subterrânea

Na realização do experimento as unidades gotejadoras de cada bancada funcionaram, em média, quatro horas por dia, até completar o tempo de funcionamento de 160 h, para potencializar a formação da incrustação nos gotejadores e nas linhas laterais. Neste período, efetuaram-se cinco avaliações de uniformidade de distribuição do efluente a cada 40 h, especificamente nos tempos de operação de 0, 40, 80, 120 e 160 h.

O tempo total de operação (160 h) foi escolhido com base nos trabalhos de Batista et al. (2014b), Silva et al. (2016) e Vale et al. (2018a,b), que relataram que esse tempo de operação foi suficiente para detectar o efeito do entupimento de emissores no desempenho hidráulico de conjuntos de irrigação por gotejamento operando com águas residuárias.

Para isso, determinou-se a vazão de 16 emissores selecionados por linha lateral (totalizando 48 emissores por unidade gotejadora), coletando-se o volume aplicado de efluente pelo emissor durante um período de três minutos, sendo condicionado em recipientes de 200 mL e medido em uma proveta graduada de 100 mL, com precisão de 1 mL, seguindo as recomendações da NBR ISO 9261 (ABNT, 2006). A vazão dos gotejadores foi calculada por meio da Equação 2.

Com os dados de vazão de cada linha lateral, calculou-se os seguintes indicadores: vazão relativa (QR), coeficiente de redução da vazão relativa (RQR), coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), coeficiente de variação de vazão (CVq) e coeficiente de uniformidade estatística (U_s), conforme as Equações 3, 4, 5, 6 e 7, respectivamente.

A pressão de serviço foi mantida no valor de 100 kPa, para obter os valores de vazões nominais nos gotejadores ensaiados. Não houve precipitação pluviométrica no período em estudo.

3.5.1.1 Monitoramento das características físico-químicas das diluições de água produzida tratada em água subterrânea

Ao final de cada avaliação, ou seja, a cada 40 h de operação das unidades gotejadoras, foram coletadas amostras das diluições referentes a cada tratamento para realização das análises físico-químicas, totalizando cinco amostragens até o encerramento dos ensaios experimentais no tempo de operação de 160 h.

As amostras eram coletadas em garrafas de vidro de 0,001 m³, no ponto à jusante do sistema de filtragem das bancadas, e preservadas em caixas isotérmicas com gelo à temperatura de 4°C, sendo transportadas até o Laboratório de Qualidade Ambiental (LQA) da UFERSA, onde foram

armazenadas em uma estufa incubadora refrigerada. Em seguida, essas amostras eram encaminhadas para o Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) do Departamento de Ciências Agrônômicas e Florestais (DECAF) da UFERSA, com a finalidade de se realizar as análises físico-químicas, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Rice et al., 2012).

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

Procedimento:

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

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

Procedimento:

- Retirou-se 25 ml da amostra de água, sendo esta alocada em copo descartável;
- Em seguida, foi levado ao fotômetro de chama;
- Efetuou-se as leituras na escala do aparelho;
- Se a leitura da amostra fosse superior ao último ponto da curva, seria necessário realizar uma nova diluição. Essa diluição poderia ser efetuada retirando-se 1 mL da amostra e acrescentando 9 mL de água deionizada.

- Determinação do cálcio (Ca^{2+})

Procedimento:

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

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

Procedimento:

- Adicionou-se 25 ml da amostra em um Erlenmeyer de 125 ml;
- Adicionou-se à amostra 4 ml da solução tampão;
- Foi colocada uma pitada do indicador Negro de Ericromo;
- Realizou-se a titulação com a solução EDTA até o ponto de viragem de rosa para azul;
- Anotou-se o volume gasto.

- Determinação do magnésio (Mg^{2+})

Procedimento:

- Seu valor foi determinado pela diferença entre os valores de $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ e Ca^{2+} .
- Determinação da razão de adsorção de sódio (RAS)

Este índice denota a proporção relativa em que se encontra o Na^+ em relação ao Ca^{2+} e Mg^{2+} , cátions divalentes que competem com o Na^+ pelos lugares de intercâmbio do solo. A RAS pode ser definida pela Equação 26.

$$RAS = \frac{Na^+}{\left(\sqrt{\frac{Ca^{2+} + Mg^{2+}}{2}}\right)} \quad (26)$$

Em que:

- RAS - Razão de adsorção de sódio, $(mmol_c L^{-1})^{0,5}$;
- Na^+ - Concentração de sódio na amostra, $mmol_c L^{-1}$;
- Ca^{2+} - Concentração de cálcio na amostra, $mmol_c L^{-1}$ e;
- Mg^{2+} - Concentração de magnésio na amostra, $mmol_c L^{-1}$.

- Determinação da dureza (Dur)

A dureza (Dur) de uma água se define como a concentração de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) que é quimicamente equivalente à concentração de cátions multivalentes (principalmente Ca^{2+} e Mg^{2+}) da água, sendo seus valores obtidos através da Equação 27.

$$Dur = (Ca^{2+} + Mg^{2+}) \cdot 50 \quad (27)$$

Em que:

Dur - Dureza do efluente, mg L^{-1} ;

Ca^{2+} - Concentração de cálcio no efluente, $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$; e

Mg^{2+} - Concentração de magnésio no efluente, $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

- Determinação do cloreto (Cl^-)

Procedimento:

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

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

Procedimento:

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

- Determinação do bicarbonato (HCO_3^-)

Procedimento:

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

- Determinação de sólidos totais (ST)

Os ST são todas as substâncias que permanecem no cadinho, após a total secagem de um determinado volume de amostra.

Procedimento:

- Primeiramente, os cadinhos foram colocados na mufla a 550°C, permanecendo nessa temperatura durante 25 minutos, para retirar a umidade;
- Programou-se a mufla para retornar à temperatura ambiente;
- Os cadinhos foram retirados com o auxílio de uma pinça e transferidos para um dessecador, durante 1 hora;
- Em seguida, os cadinhos (identificados para cada tratamento) foram pesados em balança de precisão; anotando-se o resultado em g (peso 1);
- Transferiu-se para o cadinho, um volume de 40 ml da amostra do resíduo, medido em proveta;
- Levou-se para estufa a 105°C, onde permaneceu durante 2 a 3 dias para atingir secura completa;
- Após a retirada, o cadinho foi transferido para o dessecador, permanecendo por 45 minutos para esfriar;
- Logo após, pesou-se o cadinho na mesma balança de precisão, anotando-se o resultado em g (peso 2);
- A Equação 28 foi utilizada para obtenção dos valores de ST.

$$ST = \frac{(P1 - P2) * 1000}{\frac{V_{amostra}}{1000}} \quad (28)$$

Em que:

ST - Sólidos totais, mg L⁻¹;

P1 - Peso do cadinho vazio, em g;

P2 - Peso do cadinho com resíduo, em g;

Vamostra - Volume da amostra, em mL.

- Determinação de sólidos suspensos (SS)

Os SS são todas as substâncias que após filtração e secagem, permanecem retidas na membrana (fibra de vidro). Determinado através da utilização de conjunto Kitassato para filtração e bomba à vácuo, conforme ilustrado na Figura 8.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 8. Sistema de filtragem à vácuo utilizado para determinação de sólidos suspensos

Procedimento:

- Inicialmente, pesou-se o papel filtro de fibra de vidro (47 mm de diâmetro) em balança de precisão, obtendo-se o peso 1;
- O papel filtro foi transferido com uma pinça para o funil de buchner em porcelana, adaptado ao kitassato para filtração;
- Em seguida, o sistema de filtração à vácuo foi ligado;
- Filtrou-se uma alíquota da amostra (50 ml) medida com uma proveta graduada, ficando o resíduo sólido da amostra retido no papel filtro;
- O papel filtro foi removido do funil com o auxílio de uma pinça e transferido para estufa a 105°C, permanecendo por 1 hora;
- Após secagem, o papel filtro contendo o resíduo foi resfriado em dessecador por 30 minutos;
- Em seguida, pesou-se o papel filtro (peso 2);
- Utilizou-se a Equação 29 para determinação dos valores de SS.

$$SS = \frac{(P1 - P2) * 1000}{\frac{Vamostra}{1000}} \quad (29)$$

Em que:

SS - Sólidos suspensos, mg L⁻¹;

P1 - Peso do papel filtro, em g;

P2 - Peso do papel filtro com resíduo, em g;

Vamostra - Volume da amostra, em mL.

- Determinação de sólidos dissolvidos (SD)

Os SD são todas as substâncias que não ficaram retidas na filtração e permaneceram após total secagem de determinado volume de amostra.

Procedimento:

- As concentrações de sólidos dissolvidos (SD) foram obtidas pela diferença entre as concentrações ST e SS.

3.5.1.2 Análise da incrustação formada nas unidades gotejadoras

Decorridas as 160 h de operação das unidades gotejadoras com água residuária do petróleo tratada e água subterrânea, efetuou-se o corte e abertura de três linhas laterais, sendo uma de cada tipo de emissor. Foram escolhidos os últimos dois gotejadores avaliados de cada linha, para a retirada de gotejadores obstruídos e, paralelamente, realizou-se o registro fotográfico dos mesmos.

Os gotejadores obstruídos, separados conforme o tipo (G1, G2 e G3), foram armazenados em frascos esterilizados de 100 mL, sendo posteriormente encaminhados ao Laboratório de Biologia Tecidual e do Desenvolvimento da UFERSA, onde se tentou detectar a presença de agentes biológicos na incrustação, com o auxílio de uma câmera Olympus DP72, possuindo resolução de 12.8 megapixels, acoplada a um microscópio óptico da marca Olympus BX51 (Figura 9). As amostras da incrustação foram distribuídas em lâminas de microscopia óptica, sendo analisadas ao microscópio óptico com o auxílio da objetiva de 100x.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 9. Microscópio óptico Olympus BX51

3.5.2 Experimento II: Obtenção das curvas vazão em função da pressão de serviço de gotejadores aplicando diluições de água produzida tratada

Finalizada a operação das cinco bancadas experimentais durante 160 h com água produzida tratada diluída, iniciou-se a etapa de obtenção das curvas vazão em função da pressão de serviço para cada modelo de gotejador.

Para realização do experimento foram utilizadas três bancadas, cada uma composta por nove linhas laterais novas de um único modelo de gotejador, sendo selecionados cinco emissores por linha lateral, equidistantes entre si. As bancadas compostas pelos gotejadores G1 e G2, funcionaram com um conjunto motobomba de 0,5 cv; enquanto que, para a bancada composta pelo gotejador G3, foi utilizado um conjunto motobomba de 1,0 cv, devido a faixa de pressão recomendada ser maior.

Ao todo foram avaliados 45 emissores de um único modelo, por bancada, seguindo as recomendações específicas da Norma ISO 9261 da ABNT (2006), onde preconiza que, para ensaios de emissores, o número de amostras deve ser de, no mínimo, 25 e o CV não pode exceder 7%.

Com relação as pressões, adotou-se o menor e o maior valor da faixa de pressão recomendada para os gotejadores G1 e G2, sendo o intervalo entre as pressões equidistantes entre si. Dessa forma, as pressões utilizadas foram P1 – 60 kPa, P2 – 70 kPa, P3 – 80 kPa, P4 – 90 kPa e P5 – 100 kPa para os dois gotejadores.

Já as pressões utilizadas para o gotejador G3 foram P1 – 50 kPa, P2 – 80 kPa, P3 – 110 kPa, P4 – 140 kPa e P5 – 170 kPa, visto que o sistema não conseguiu atingir a pressão máxima recomendada pelo fabricante de 300 kPa, mesmo utilizando uma bomba centrífuga de 1 CV.

O teste para obtenção das curvas funcionou da seguinte forma:

- O reservatório à jusante da bancada foi preenchido com a primeira diluição (T1);
- Empregando-se novamente o tempo de coleta de três minutos, mediu-se o volume aplicado pelos gotejadores selecionados por linha lateral com o sistema operando sob a pressão de serviço P1;
- Após a coleta, a pressão do sistema foi alterada para P2 e os volumes medidos novamente;
- Repetiu-se o mesmo procedimento para o sistema operando sob as demais pressões (P3, P4 e P5);
- Finalizada as coletas para T1, o reservatório foi esvaziado e preenchido com a segunda diluição (T2), iniciando uma nova avaliação.

As curvas de vazão em função da pressão foram obtidas para os três modelos de gotejadores em cada tratamento (T1, T2, T3, T4 e T5). Essas curvas caracterizam o comportamento da

vazão do emissor em função da pressão e do regime de escoamento caracterizado pelo expoente de descarga (x), sendo a vazão calculada por meio da Equação 1.

A partir das curvas, foram geradas as equações potenciais características dos gotejadores, obtidas por meio do seguinte desdobramento:

$$q = k \cdot h^x$$

$$\log(q) = \log(k \cdot h^x)$$

$$\log(q) = \log(k) + \log(h^x)$$

$$\log(q) = \log(k) + x \log(h)$$

Dessa forma, ao linearizar a equação potencial, tem-se:

$$Y = A + BX \tag{30}$$

Em que:

$$A = \log(k), \text{ sendo } k = 10^A;$$

$$B = x, \text{ e}$$

$$X = \log(h).$$

3.5.3 Experimentação e análise estatística

Para a avaliação do desempenho hidráulico e detecção do nível de entupimento dos três tipos de gotejadores aplicando água produzida do petróleo diluída, durante 160 h, montou-se um experimento no delineamento inteiramente casualizado (DIC) em esquema de parcelas subdivididas, com três repetições; tendo nas parcelas os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5), nas subparcelas os três tipos de gotejadores não autocompensantes (G1 - 1,6 L h⁻¹, G2 - 1,6 L h⁻¹ e G3 - 1,7 L h⁻¹) e nas subsubparcelas os tempos de avaliação (0, 40, 80, 120 e 160 h) da uniformidade de distribuição do efluente.

Considerando-se três fatores (a_i, b_j e c_k) com classificação cruzada, para i = 1, 2, ..., a níveis, j = 1, 2, ..., b níveis e k = 1, 2, ..., c níveis, os graus de liberdade de tratamentos (abc-1), devem ser desdobrados nos efeitos principais dos fatores e nos efeitos das interações duplas e tripla, como seguem: A, B, C, AxB, AxC, BxC e AxBxC (Tabela 9).

Tabela 9. Análise de variância de um experimento em parcelas subsubdivididas no delineamento inteiramente casualizado (DIC)

FV	GL	SQ	QM	F
A	(a-1)	SQA	SQA/(a-1)	QMA/QMRes(a)
Resíduo (a)	a(r-1)	SQRes(a)	SQRes(a)/[a(r-1)]	
B	(b-1)	SQB	SQB/(b-1)	QMTB/QMRes(b)
Int. AxB	(a-1)(b-1)	SQAxB	SQAxB/[(a-1)(b-1)]	QMAxB/QMRes(b)
Resíduo (b)	a(b-1)(r-1)	SQRes(b)	SQRes(b)/[a(b-1)(r-1)]	
C	(c-1)	SQC	SQC/(c-1)	QMC/ QMRes(c)
Int. AxC	(a-1) (c-1)	SQAxC	SQAxC/[(a-1)(c-1)]	QMAxC/ QMRes(c)
Int. BxC	(b-1) (c-1)	SQBxC	SQBxC/[(b-1)(c-1)]	QMBxC/ QMRes(c)
Int. AxBxC	(a-1) (b-1) (c-1)	SQAxBxC	SQAxBxC/[(a-1)(b-1)(c-1)]	QMAxBxC/ QMRes(c)
Resíduo (c)	ab(c-1) (r-1)	SQRes(c)	SQRes(c)/[ab(c-1) (r-1)]	
Total	abcr-1	SQtotal		

Nota: A = Tratamentos, B = Tipos de Gotejadores e C = Tempos de Avaliação.

Fonte: Adaptado de Ribeiro Júnior & Melo (2008).

Para a interação AxBxC significativa, tem-se:

$$QMRes.Méio = \frac{QMRes(a)+(b-1)QMRes(b)+b(c-1)QMRes(b)}{bc} \quad (31)$$

$$n' = \frac{[QMRes(a) +(b-1)QMRes(b)+b(c-1)QMRes(c)]^2}{\frac{[QMRes(a)]^2}{n(a)} + \frac{[(b-1)QMRes(b)]^2}{n(b)} + \frac{[b(c-1)QMRes(c)]^2}{n(c)}} \quad (32)$$

Em que:

n' - número de graus de liberdade do resíduo;

n(a) - número de graus de liberdade do resíduo (a);

n(b) - número de graus de liberdade do resíduo (b);

n(c) - número de graus de liberdade do resíduo (c).

Assim, através das Equações 33, 34 e 35, foram obtidos os coeficientes de variação (CV) referentes as parcelas, subparcelas e subsubparcelas, respectivamente.

$$CV_{parcela} = \left[\frac{\sqrt{QMR(a)}}{M} \right] \cdot 100 \quad (33)$$

$$CV_{subparcela} = \left[\frac{\sqrt{QMR(b)}}{M} \right] \cdot 100 \quad (34)$$

$$CV_{\text{subsubparcela}} = \left[\frac{\sqrt{\text{QMR}(c)}}{M} \right] \cdot 100 \quad (35)$$

Os indicadores de qualidade da água produzida do petróleo diluída foram submetidos à análise descritiva, determinando-se a média e o desvio padrão.

Os dados da uniformidade de distribuição do efluente foram submetidos à análise de variância (ANOVA) à 1% de probabilidade pelo teste F. As médias foram comparadas pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade. Os modelos de regressão foram escolhidos com base no coeficiente de determinação ($R^2 \geq 80\%$); na significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste t num nível de até 10%; e no processo em estudo.

Quanto ao experimento II, as curvas vazão em função da pressão de serviço foram obtidas por análise de regressão, onde os modelos de regressão foram escolhidos com base no coeficiente de determinação ($R^2 \geq 80\%$); na significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste t num nível de até 10%; e no processo em estudo.

O coeficiente de determinação (R^2) indica quanto da variação dos dados foi explicada pelo modelo. Dessa forma, quanto maior o R^2 , melhor será o modelo e menor será o erro, sendo que, os modelos com valores de R^2 acima de 80% são mais confiáveis para fins preditivos. Assim, quanto mais próximo for de 100% mais o modelo consegue prever valores de novas observações.

Nas análises estatísticas dos dados utilizou-se o programa computacional Sistema para Análises Estatísticas Versão 9.1 (SAEG, 2007).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento I

4.1.1 Análise das características físico-químicos da água produzida tratada diluída em água subterrânea

Na Tabela 10 estão apresentados os valores médios e desvios padrão referentes às características físico-químicos das amostras das diluições de água produzida tratada (T1, T2, T3, T4 e T5). As médias são referentes às coletas realizadas para cada tratamento nos tempos de operação de 0, 40, 80, 120 e 160 h. Além disso, estão apresentados os valores padrões relacionados ao uso agrícola e ao risco de obstrução de gotejadores.

Os valores médios do potencial hidrogeniônico da água produzida tratada situaram-se dentro da faixa de 5,0 a 9,0, estabelecida pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017) para reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. Conforme Ribeiro et al. (1999), o nível de danos às plantas relacionados com a qualidade da água de irrigação foi considerado severo ($\text{pH} > 8$).

O risco de obstrução de gotejadores também foi considerado como severo para todas as diluições, pois os valores médios foram superiores ao limite de 7,5, estabelecido por Nakayama et al. (2006). Esse resultado é semelhante aos obtidos por Liu & Huang (2009) e Silva et al. (2017) que também afirmaram que o pH da água de irrigação representava um risco grave de obstrução de gotejadores.

A condutividade elétrica (CE) das diluições de água produzida tratada variou de 0,63 a 0,78 dS m^{-1} . Esses valores são inferiores ao limite de 3,0 dS m^{-1} , estabelecido para reuso externo de efluentes não sanitários destinados à fins agrícolas e florestais, conforme a Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017). Já o nível de danos às culturas relacionado à qualidade da água de irrigação foi classificado como baixo (0,5 a 0,75 dS m^{-1}) para os tratamentos T1, T2, T4 e T5, e como moderado (0,75 a 3,0 dS m^{-1}) para o tratamento T3. De acordo com Capra & Scicolone (1998), o risco de obstrução de gotejadores foi considerado baixo para essa característica, pois os valores médios foram inferiores ao limite de 1,0 dS m^{-1} .

Tabela 10. Valores médios e desvios padrão das características físico-químicas da água produzida tratada diluída, em comparação aos padrões referentes ao uso agrícola e risco de obstrução dos gotejadores

Características	Médias e desvios padrão dos tratamentos										Uso agrícola	Risco de obstrução
	T1		T2		T3		T4		T5			
pH	8,70	± 0,27	8,57	± 0,20	8,61	± 0,23	8,47	± 0,16	8,60	± 0,05	5,0 - 9,0 ⁽¹⁾	Severo ⁽⁵⁾
CE (dS m ⁻¹)	0,72	± 0,08	0,75	± 0,16	0,78	± 0,12	0,72	± 0,06	0,63	± 0,07	< 3,0 ⁽¹⁾	Baixo ⁽⁶⁾
Na ⁺ (mmolc L ⁻¹)	6,38	± 1,20	6,38	± 1,57	5,95	± 1,23	4,31	± 0,49	3,83	± 0,58	< 3,0 ⁽²⁾	n.c.
K ⁺ (mmolc L ⁻¹)	0,50	± 0,10	0,60	± 0,08	0,47	± 0,03	0,54	± 0,03	0,52	± 0,03	< 0,05 ⁽³⁾	n.c.
RAS (mmolc L ⁻¹) ^{0,5}	9,00	± 1,98	7,66	± 2,06	6,60	± 1,60	4,22	± 0,61	3,69	± 0,61	< 3,0 ⁽²⁾	n.c.
Ca ²⁺ (mmolc L ⁻¹)	0,50	± 0,27	0,68	± 0,30	0,86	± 0,45	1,07	± 0,55	1,05	± 0,94	1,0 a 5,0 ⁽²⁾	Baixo ⁽⁶⁾
Mg ²⁺ (mmolc L ⁻¹)	0,38	± 0,13	0,51	± 0,24	0,74	± 0,25	0,65	± 0,51	1,00	± 0,61	< 5,25 ⁽²⁾	Baixo ⁽⁶⁾
Dur (mg L ⁻¹)	45,50	± 8,39	69,50	± 8,44	84,50	± 10,94	98,00	± 7,95	108,00	± 6,58	< 150 ⁽⁴⁾	n.c.
Cl ⁻ (mmolc L ⁻¹)	3,00	± 0,47	3,00	± 0,47	3,00	± 0,09	2,60	± 0,37	2,60	± 0,17	< 2,0 ⁽²⁾	n.c.
CO ₃ ²⁻ (mmolc L ⁻¹)	1,60	± 0,44	1,20	± 0,46	1,20	± 0,59	1,40	± 0,27	1,40	± 0,30	< 0,05 ⁽³⁾	n.c.
HCO ₃ ⁻ (mmolc L ⁻¹)	3,00	± 0,11	3,30	± 0,32	3,40	± 0,38	3,40	± 0,22	3,40	± 0,29	< 0,7 ⁽²⁾	n.c.
SS (mg L ⁻¹)	10,00	± 5,55	10,00	± 4,69	8,00	± 2,28	12,00	± 5,59	8,00	± 4,90	< 100 ⁽¹⁾	Baixo ^(5,6)
SD (mg L ⁻¹)	298,00	± 122,49	372,50	± 97,12	379,00	± 75,13	318,50	± 129,11	318,50	± 129,04	< 2000 ⁽³⁾	Baixo ^(5,6)

Nota: pH - potencial hidrogeniônico; CE - condutividade elétrica; Na⁺ - sódio; K⁺ - potássio; RAS - razão de adsorção de sódio; Ca²⁺ - cálcio; Mg²⁺ - magnésio; Dur - dureza; Cl⁻ - cloreto; CO₃²⁻ - carbonato; HCO₃⁻ - bicarbonato; SS - sólidos suspensos e SD - sólidos dissolvidos. ⁽¹⁾Resolução COEMA nº 2/2017, referente ao reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais; ⁽²⁾Ribeiro et al. (1999); ⁽³⁾Almeida (2010); ⁽⁴⁾Pitts et al. (1990); ⁽⁵⁾Nakayama et al. (2006); ⁽⁶⁾Capra & Scicolone (1998); n.c. - não classificado. T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

O sódio, para todas as diluições, apresentou nível moderado de danos às culturas relacionado com a qualidade da água de irrigação, pois os valores médios estão dentro da faixa de 3,0 a 7,8 mmolc L⁻¹, estabelecida por Ribeiro et al. (1999). No entanto, os teores foram inferiores ao limite de 40 mmolc L⁻¹, atendendo aos padrões para água de irrigação, conforme Almeida (2010).

A relação sódio/cálcio para os tratamentos foi de 12,76 para o T1; 9,38 para o T2; 6,92 para o T3; 4,03 para o T4 e 3,65 para o T5. Dessa forma, pode-se constatar que em nenhum dos tratamentos a relação sódio/cálcio foi superior ao limite (3:1) estabelecido por Ayers & Westcot (1999), indicando pouco risco de redução na infiltração de água no solo, devido à dispersão das argilas e entupimento dos poros da superfície do solo.

As concentrações médias de potássio das diluições encontram-se fora do intervalo de 0,0 a 0,05 mmolc L⁻¹ recomendado por Almeida (2010), adequado para o uso de água nas atividades de irrigação de cultivos agrícolas.

A razão de adsorção de sódio das diluições de água produzida tratada variou de 3,69 a 9,0 (mmolc L⁻¹)^{0,5}. O nível de danos às culturas foi considerado moderado (3,0 a 6,0 (mmolc L⁻¹)^{0,5}) para os tratamentos T4 e T5, e severo (> 6,0 (mmolc L⁻¹)^{0,5}) para os demais tratamentos, conforme classificação proposta por Ribeiro et al. (1999). Os valores médios encontram-se dentro da faixa de 0,0 a 15,0 (mmolc L⁻¹)^{0,5} estabelecida por Almeida (2010), considerada usual para água de irrigação.

Os teores médios de cálcio apresentaram-se dentro da faixa de 1,0 a 5,0 mmolc L⁻¹ proposta por Ribeiro et al. (1999), ou abaixo dela (T1, T2 e T3), não apresentando nenhum dano às culturas referente à qualidade da água de irrigação. Os valores de magnésio foram inferiores ao limite de 5,25 mmolc L⁻¹ estabelecido pelos referidos autores. De acordo com Almeida (2010), os teores de cálcio e magnésio atendem aos padrões para água de irrigação, pois são inferiores aos limites de 10 e 2,5 mmolc L⁻¹, respectivamente. Já o risco de obstrução dos gotejadores foi considerado baixo para cálcio e magnésio, pois os valores médios foram inferiores aos limites de 12,5 e 2,0 mmolc L⁻¹, respectivamente, determinados por Capra & Scicolone (1998).

A dureza nas diluições T1, T2, T3, T4 e T5 foram de 45,50, 69,50, 84,50, 98 e 108 mg L⁻¹, respectivamente, sendo o risco para uso na irrigação classificado como baixo (< 150 mg L⁻¹), conforme critério estabelecido por Pitts et al. (1990).

As concentrações médias de cloreto estão dentro da faixa de 2,0 a 8,5 mmolc L⁻¹, apresentando nível médio de danos às culturas relacionado à qualidade da água para irrigação (Ribeiro et al., 1999). Além disso, os valores foram inferiores ao limite de 30 mmolc L⁻¹ estabelecido por Almeida (2010) como usual para água de irrigação.

O cloreto aliado à presença de carbonato e bicarbonato de cálcio favorece a formação de precipitados químicos. Liu & Huang (2009) observaram que a precipitação química foi a principal razão do entupimento em sistemas de irrigação operando com efluente de esgoto tratado.

Os valores médios de carbonato encontram-se fora da faixa de 0 a 0,05 mmol_c L⁻¹, considerada usual para água de irrigação; enquanto os teores de bicarbonato enquadram-se dentro da faixa de 0,0 a 10,0 mmol_c L⁻¹, ambas recomendadas por Almeida (2010). De acordo com Ribeiro et al. (1999), o bicarbonato apresentou nível severo (> 3,0 mmol_c L⁻¹) de danos às culturas relacionado à qualidade da água de irrigação para todas as diluições, exceto para o tratamento testemunha (100% AS) que obteve valor médio igual a 3,0 mmol_c L⁻¹.

Com relação aos sólidos suspensos (SS), suas concentrações foram inferiores ao limite de 100 mg L⁻¹ imposto pela Resolução COEMA nº 2/2017 (Ceará, 2017), para reuso externo de efluentes não sanitários com fins agrícolas e florestais. Também estão abaixo do limite de 200 mg L⁻¹, classificando o risco de entupimento de emissores como baixo, de acordo com Capra & Scicolone (1998).

Os baixos valores de sólidos suspensos nas amostras podem ser explicados devido as coletas das mesmas serem realizadas após o sistema de filtração (filtro de tela), reduzindo assim a quantidade de sedimentos do efluente. Ao avaliar o desempenho do filtro de tela em sistema de irrigação por gotejamento aplicando diluições de efluentes de laticínios, Marques (2016) constatou que o uso do filtro proporcionou boa eficiência de remoção de sólidos suspensos, variando de 0 a 80,95% ao longo do período experimental.

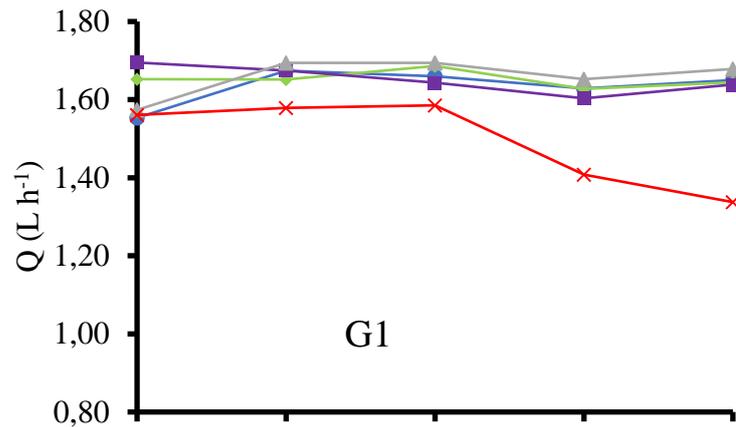
Nas diluições da água produzida tratada, as concentrações de sólidos dissolvidos variaram de 298 a 379 mg L⁻¹, sendo inferiores ao limite de 2000 mg L⁻¹, apresentado por Almeida (2010) como usual para água de irrigação. O risco de obstrução de gotejadores foi considerado baixo (< 2000 mg L⁻¹), conforme classificação estabelecida por Nakayama et al. (2006).

4.1.2 Desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida tratada

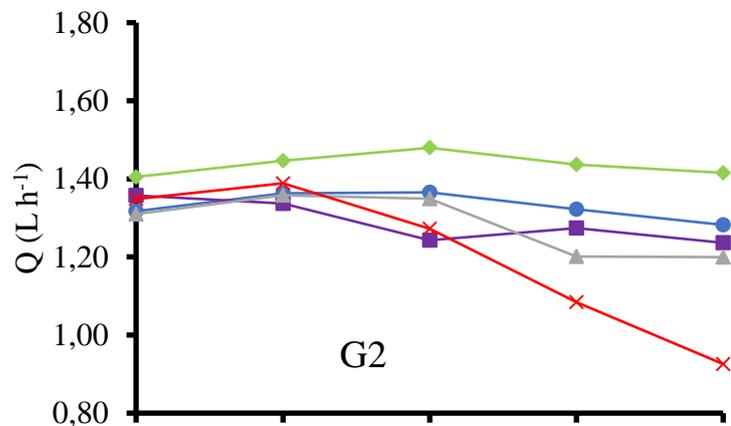
4.1.2.1 Vazão dos gotejadores (Q)

Na Figura 10 estão apresentados os gráficos da variável Q, ao longo do tempo de operação do sistema, nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

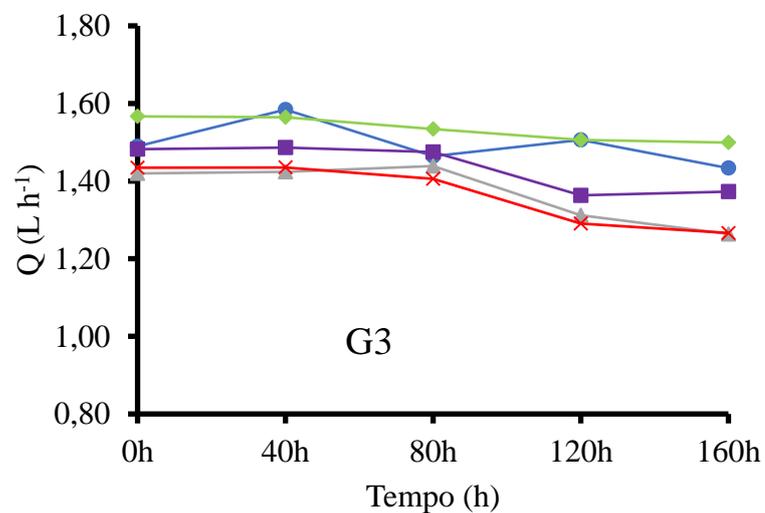
A.



B.



C.



● T1 ◆ T2 ■ T3 ▲ T4 × T5

Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 10. Gráficos da vazão (Q) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Para o gotejador G1 (Figura 10A), nos tempos de funcionamento inicial (0 h) e final (160 h), as subunidades de irrigação submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, apresentaram valores de Q iguais a 1,55 e 1,65 L h⁻¹; 1,65 e 1,64 L h⁻¹; 1,70 e 1,64 L h⁻¹; 1,57 e 1,68 L h⁻¹; e 1,56 e 1,34 L h⁻¹, respectivamente.

Decorridas as 160 h de operação do sistema, observou-se que houveram reduções nos valores de Q do gotejador G1 de 0,61, 3,53 e 14,10%, nas subunidades submetidas aos tratamentos T2, T3 e T5, respectivamente; enquanto que, nas subunidades de irrigação submetidas aos tratamentos T1 e T4 ocorreu aumento de Q da ordem de 6,45 e 7,01%, respectivamente.

Os valores médios de Q para o gotejador G2 (Figura 10B), nos tempos de operação de 0 e 160 h, foram de 1,32 e 1,28 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T1; de 1,41 e 1,42 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T2; de 1,36 e 1,24 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T3; de 1,31 e 1,20 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T4 e de 1,35 e 0,93 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T5.

Após 160 h de operação do sistema, houveram reduções nos valores de Q do gotejador G2 iguais a 3,03, 8,82, 8,40 e 31,11% nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T3, T4 e T5, respectivamente; porém, na subunidade submetida ao tratamento T2 ocorreu aumento de vazão da ordem de 0,71%.

Batista et al. (2014c) obtiveram redução na vazão de um tipo de gotejador não autocompensante (2,00 L h⁻¹), oscilando de 16 a 58% para quatro proporções de tempo de irrigação com água residuária de suinocultura e água de abastecimento público, após 160 h de operação das unidades gotejadoras.

Com relação ao gotejador G3 (Figura 10C), os valores médios de Q, nos tempos de operação inicial e 160 h, foram de 1,49 e 1,43 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T1; de 1,57 e 1,50 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T2; de 1,48 e 1,37 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T3; de 1,42 e 1,26 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T4 e de 1,43 e 1,27 L h⁻¹ na subunidade submetida ao tratamento T5.

Decorridas as 160 h de operação do sistema, ocorreram reduções nos valores de Q do gotejador G3 da ordem de 4,03, 4,67, 7,43, 11,27 e 11,19% nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

Diante dos valores apresentados, notou-se que a maior redução de vazão, após 160 h de operação do sistema, ocorreu para a subunidade com gotejador G2 submetida ao tratamento T5; enquanto o gotejador G1 apresentou os maiores valores de vazão, decorridas as 160 h, para todos os tratamentos.

Reduções nos valores de vazão também foram detectadas por Cunha et al. (2017) trabalhando com água residuária da castanha de caju, que apresentou decréscimos de 18, 25,

14, 26 e 10% nas unidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (Netafim Streamline), G2 (Netafim Tiran), G3 (Netafim PCJ CNJ), G4 (NaanDanJain TalDrip) e G5 (Netafim Super Typhoon), respectivamente, após 200 h de funcionamento do sistema. Já Fernandes et al. (2014) notaram redução de até 42% na vazão dos gotejadores utilizados na aplicação de água residuária da castanha de caju durante 160 h.

Na Tabela 11 encontram-se as equações de regressão ajustadas à variável Q, em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras, para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) avaliados, apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R²).

Tabela 11. Equações de regressão ajustadas à variável Q em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R ²
Q			
T1	G1	$\hat{Q} = 1,556 + 0,0266*T^{1/2} - 0,00162^0T$	0,88
	G2	$\hat{Q} = 1,321 - 0,00000973*T^2 + 0,00128*T$	0,95
	G3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,495$	-
T2	G1	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,652$	-
	G2	$\hat{Q} = 1,406 - 0,00000902*T^2 + 0,00147*T$	0,86
	G3	$\hat{Q} = 1,573 - 0,000483**T$	0,94
T3	G1	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,651$	-
	G2	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,290$	-
	G3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,436$	-
T4	G1	$\hat{Q} = 1,576 + 0,0275*T^{1/2} - 0,00163^0T$	0,90
	G2	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,283$	-
	G3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,372$	-
T5	G1	$\hat{Q} = 1,557 + 0,0337^0T^{1/2} - 0,00406*T$	0,91
	G2	$\hat{Q} = 1,434 - 0,00287**T$	0,87
	G3	$\hat{Q} = 1,463 - 0,00120*T$	0,87

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

O fator T afetou a vazão, indicando entupimento nos gotejadores. Após 160 h de operação das unidades de irrigação por gotejamento, o menor valor (0,97 L h⁻¹) de Q foi observado para o gotejador G2 submetido ao T5, e o maior valor (1,66 L h⁻¹) foi verificado para o G1 submetido ao T4.

O modelo de regressão raiz quadrada foi o que melhor se ajustou aos dados de Q, em função de T, para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1, T4 e T5, apresentando valores do R² iguais a 0,88, 0,90 e 0,91, respectivamente.

Já o modelo quadrático representou melhor a relação entre as variáveis Q e T para o gotejador G2 submetido aos tratamentos T1 e T2, tendo R^2 de 0,95 e 0,86, respectivamente.

O modelo de regressão linear ajustou-se melhor aos dados de Q, em função de T, para o gotejador G3 submetido ao T2, apresentando R^2 igual a 0,94 e para os gotejadores G2 e G3 submetidos ao tratamento T5, com R^2 iguais a 0,87; corroborando com Fernandes et al. (2014) que, também, ajustaram o modelo linear à relação entre os dados de vazão e tempo de operação para as unidades de irrigação dotadas dos gotejadores G1 (Plastro Hydrodrip Super) e G2 (Netafim PCJ-CNJ), operando com água residuária da suinocultura, apresentando R^2 iguais a 0,90 e 0,62, respectivamente.

Para as demais combinações entre tipos de gotejadores e tratamentos, a média foi a melhor representação entre os dados de Q e T, indicando que não houve efeito da obstrução no desempenho dos gotejadores.

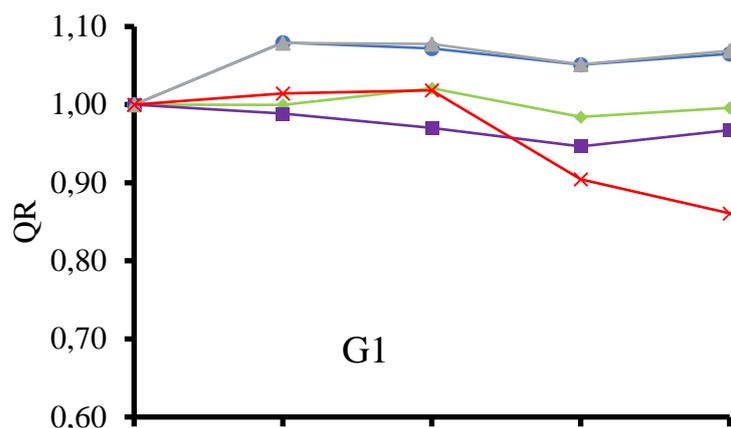
4.1.2.2 Vazão relativa (QR)

Estão ilustrados, na Figura 11, os gráficos da variável QR, ao longo do tempo de operação do sistema, nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP). Evidenciou-se que os valores médios de QR foram iguais a 1,00 no tempo de operação inicial (0 h), para os três tipos de gotejadores, visto que a vazão atual foi igual a vazão inicial.

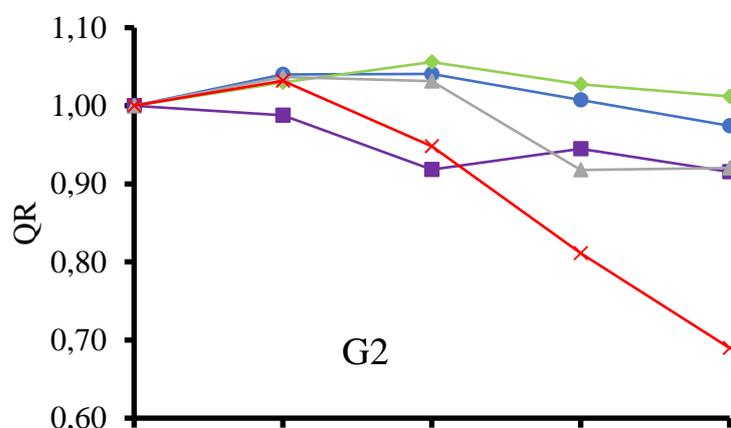
No tempo de operação final (160 h), para o gotejador G1 (Figura 11A), os valores médios de QR foram iguais a 1,00 na subunidade submetida ao tratamento T2, evidenciando ausência de entupimento; iguais a 1,07 nas subunidades submetidas aos tratamentos T1 e T4, indicando aumento de vazão; e iguais a 0,97 e 0,86 nas subunidades submetidas aos tratamentos T3 e T5, respectivamente, indicando entupimento de gotejadores que resulta na redução da vazão.

Para o gotejador G2 (Figura 11B), no tempo de operação final (160 h), os valores médios de QR foram iguais a 0,97, 0,92, 0,92 e 0,69, nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T3, T4 e T5, respectivamente, indicando redução de vazão ($QR < 1,00$); enquanto que, na subunidade submetida ao tratamento T2 ocorreu um ligeiro aumento de vazão, com QR igual a 1,01. Com relação ao gotejador G3 (Figura 11C), os valores médios de QR foram iguais a 0,96, 0,96, 0,93, 0,89 e 0,89, quando submetidos aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente, evidenciando que ocorreu redução da vazão ($QR < 1,00$) devido ao entupimento dos gotejadores.

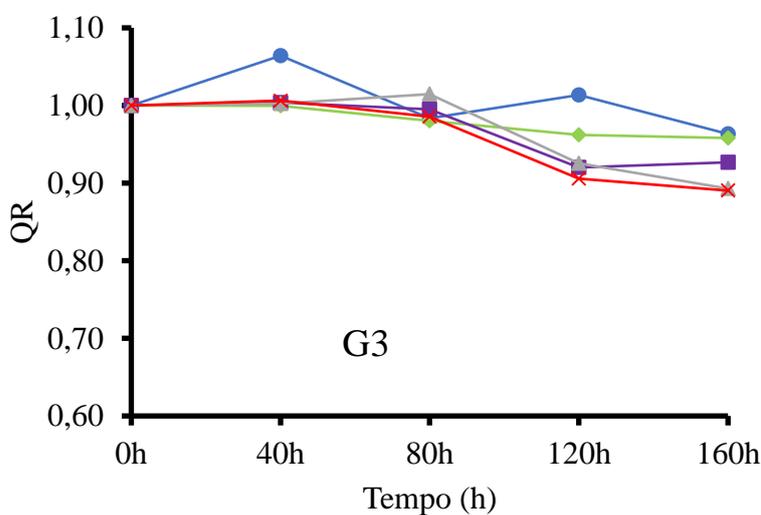
A.



B.



C.



—●— T1 —◆— T2 —■— T3 —▲— T4 —×— T5

Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 11. Gráficos da vazão relativa (QR) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Fischer Filho et al. (2017), ao avaliar o desempenho de gotejadores aplicando efluente de esgoto tratado durante 600 h, constataram que o gotejador Chapin (1,24 L h⁻¹) destacou-se com o menor valor médio (0,88) de vazão relativa, caracterizando-se como suscetível à redução da vazão. Diferentemente, Dalri et al. (2017) encontraram valor médio de vazão relativa para o gotejador QueenGil (1,8 L h⁻¹) igual a 0,53, após 800 h de operação do sistema com filtro de tela e efluente de esgoto puro.

Conforme classificação adaptada de Capra & Scicolone (1998), os valores médios de QR, para todas as combinações entre tipos de gotejadores e tratamentos, receberam a classificação alta (> 0,39 L h⁻¹) nos tempos de operação de 0 e 160 h.

Constam, na Tabela 12, as equações de regressão ajustadas à variável QR, em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras, para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos avaliados (T1, T2, T3, T4 e T5), apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R²).

Tabela 12. Equações de regressão ajustadas à variável QR em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados.

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R ²
QR			
T1	G1	$\widehat{QR} = 1,002 + 0,0175*T^{1/2} - 0,00106^0T$	0,89
	G2	$\widehat{QR} = 1,004 - 0,00000805*T^2 + 0,00108*T$	0,95
	G3	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 1,005$	-
T2	G1	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 1,000$	-
	G2	$\widehat{QR} = 1,000 - 0,00000652*T^2 + 0,00110*T$	0,88
	G3	$\widehat{QR} = 1,004 - 0,000303**T$	0,93
T3	G1	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 0,975$	-
	G2	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 0,953$	-
	G3	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 0,969$	-
T4	G1	$\widehat{QR} = 1,002 + 0,0178*T^{1/2} - 0,00105^0T$	0,90
	G2	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 0,981$	-
	G3	$\widehat{QR} = \overline{QR} = 0,967$	-
T5	G1	$\widehat{QR} = 0,998 + 0,0219^0T^{1/2} - 0,00261*T$	0,91
	G2	$\widehat{QR} = 1,064 - 0,00210*T$	0,86
	G3	$\widehat{QR} = 1,021 - 0,00080*T$	0,84

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Notou-se que o menor (0,73) e o maior valor (1,06) de QR foram encontrados para o gotejador G2 submetido ao T5 e para o gotejador G1 submetido ao T4, respectivamente, após 160 h de operação das unidades de irrigação.

O modelo de regressão raiz quadrada ajustou-se melhor aos dados de QR, em função de T, para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1, T4 e T5, com valores de R^2 iguais a 0,89, 0,90 e 0,91, respectivamente.

O modelo linear foi o que melhor representou a relação entre as variáveis QR e T para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5, apresentando R^2 igual a 0,86, e para o gotejador G3 submetido aos tratamentos T2 e T5, com R^2 iguais a 0,93 e 0,84, respectivamente.

Para o gotejador G2 submetido aos tratamentos T1 e T2, o modelo quadrático foi o que melhor se ajustou aos dados de QR, em função de T, apresentando R^2 de 0,95 e 0,88, respectivamente; corroborando com o resultado encontrado por Mesquita et al. (2016b) em estudo realizado com unidades de irrigação aplicando percolado de aterro sanitário diluído, durante 160 h, onde o modelo quadrático representou melhor a relação entre os dados de vazão relativa e tempo de operação para o gotejador G1 (Plastro Hydrodrip Super), sendo o valor de R^2 igual a 0,60.

Os valores de QR não foram alterados significativamente, pelo tempo de operação, para as demais combinações entre gotejadores e tratamentos, sendo a média a melhor representação para os dados; semelhantemente ao resultado encontrado por Mesquita et al. (2016b), onde a média, também, ajustou-se melhor aos dados de vazão relativa e tempo de operação para os gotejadores Netafim PCJ-CNJ (G2, G3 e G4), em unidades de irrigação aplicando percolado de aterro sanitário diluído.

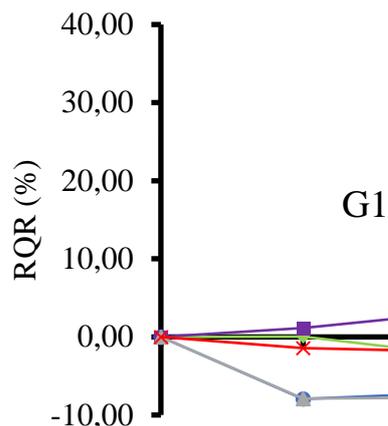
4.1.2.3 Coeficiente de redução da vazão relativa (RQR)

Constam na Figura 12 os valores médios referentes ao RQR, ao longo do tempo de operação das subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

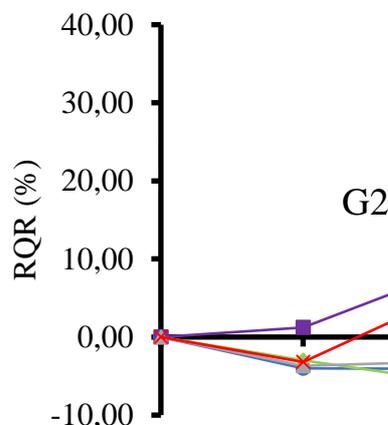
No tempo de operação inicial (0 h) os valores médios de RQR não sofreram alterações, visto que a vazão atual dos gotejadores foi igual à vazão inicial.

Os valores médios de RQR no tempo de operação final (160 h), para o gotejador G1 (Figura 12A), foram de -6,50, 0,41, 3,25, -6,91 e 13,92% nos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. Para o gotejador G2 (Figura 12B), os valores finais de RQR foram de 2,57% para o tratamento T1, de -1,18% para o tratamento T2, de 8,47% para o tratamento T3, de 7,95% para o tratamento T4 e de 31,03% para o tratamento T5. Com relação ao gotejador G3 (Figura 12C), os valores médios finais de RQR foram de 3,68, 4,20, 7,33, 10,71 e 10,97% nas subunidades gotejadoras submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente.

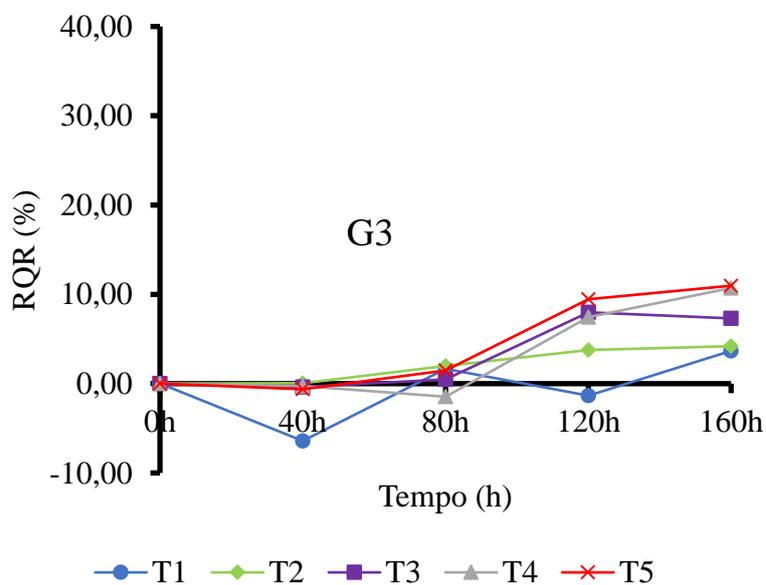
A.



B.



C.



Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 12. Gráficos do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Segundo Mesquita et al. (2016b), valores de RQR superiores a zero ($RQR > 0$) indicam entupimento dos gotejadores que ocasiona redução da vazão dos emissores, enquanto valores de RQR inferiores a zero ($RQR < 0$) evidenciam obstrução dos gotejadores em função do aumento da vazão dos emissores.

Observou-se que ocorreram elevações na vazão atual do gotejador G1 ($RQR < 0$), ao longo de todo o período de operação do sistema, quando submetido aos tratamentos T1 e T4, e para o gotejador G2 quando submetido ao tratamento T2. Esse fato pode ser explicado pelo acúmulo de incrustação, nas paredes do labirinto dos gotejadores, diminuindo a área de passagem e aumentando a pressão do fluxo do efluente no labirinto, elevando, conseqüentemente, a vazão do emissor.

Seguindo a classificação proposta por Capra & Scicolone (1998), constatou-se que todos os valores médios de RQR foram inferiores a 61%, sendo classificados como baixos.

Liu & Huang (2009) avaliaram os níveis de entupimento de três tipos de gotejadores operando com água residuária sanitária tratada, durante 1680 h. Ao final do estudo notaram que o gotejador com escoamento laminar foi o que apresentou os maiores níveis de obstrução com valor de RQR superior a 75%.

As equações de regressão ajustadas à variável RQR, em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras, para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos avaliados (T1, T2, T3, T4 e T5), apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R^2), estão apresentadas na Tabela 13.

Evidenciou-se, nessa tabela, após 160 h de operação das unidades de irrigação, que o menor valor (-5,85%) de RQR foi constatado para o gotejador G1 submetido ao tratamento T4, e o maior valor (27,15%) foi observado para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5.

O modelo raiz quadrada apresentou melhor ajuste em relação aos valores de RQR, em função de T, para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1, T4 e T5, apresentando valores de R^2 iguais a 0,89, 0,90 e 0,91, respectivamente.

Para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5 e o gotejador G3 submetido aos tratamentos T2 e T5, o modelo linear ajustou-se melhor aos dados de RQR, em função de T, com valores de R^2 iguais a 0,86, 0,93 e 0,84, respectivamente.

No trabalho de Batista et al. (2014c) notou-se que os modelos raiz quadrada, linear e quadrático foram os que melhor se ajustaram aos dados de RQR em função do tempo de operação, para as 12 combinações entre três modelos de gotejadores e quatro tempos de irrigação com água residuária de suinocultura e água de abastecimento, durante 160 h.

Tabela 13. Equações de regressão ajustadas à variável RQR em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R ²
		RQR	
T1	G1	$\widehat{RQR} = -0,181 - 1,754*T^{1/2} + 0,106^0T$	0,89
	G2	$\widehat{RQR} = -0,359 + 0,000805*T^2 - 0,108*T$	0,95
	G3	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = -0,491$	-
T2	G1	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = -0,0145$	-
	G2	$\widehat{RQR} = 0,00116 + 0,000652*T^2 - 0,110*T$	0,88
	G3	$\widehat{RQR} = -0,425 + 0,0303**T$	0,93
T3	G1	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = 2,541$	-
	G2	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = 4,674$	-
	G3	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = 3,087$	-
T4	G1	$\widehat{RQR} = -0,150 - 1,779*T^{1/2} + 0,105^0T$	0,90
	G2	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = 1,866$	-
	G3	$\widehat{RQR} = \overline{RQR} = 3,291$	-
T5	G1	$\widehat{RQR} = 0,201 - 2,194^0T^{1/2} + 0,261*T$	0,91
	G2	$\widehat{RQR} = -6,451 + 0,210*T$	0,86
	G3	$\widehat{RQR} = -2,152 + 0,0800*T$	0,84

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Já o modelo quadrático foi o que melhor explicou a relação entre aos dados de RQR e T para o gotejador G2 submetido aos tratamentos T1 e T2, apresentando R² iguais a 0,95 e 0,88, respectivamente.

Para as demais combinações entre gotejadores e tratamentos, a média se ajustou melhor à relação entre os dados de RQR e T, indicando maior resistência à obstrução nessas situações.

Avaliando o desempenho de gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído, Mesquita et al. (2016b) observaram que o modelo quadrático se ajustou melhor aos dados de RQR, em função do tempo de operação para o gotejador G1; enquanto que, os valores de RQR dos demais gotejadores não foram modificados, significativamente, pelo tempo de operação, demonstrando que a média ajustou-se melhor aos dados.

4.1.2.4 Coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Na Figura 13 estão apresentados os gráficos da variável CUD, ao longo do tempo de operação do sistema, nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

Na Figura 13A, referente ao gotejador G1, observou-se que nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h), os valores médios do CUD foram de 91 e 96% para o tratamento T1, de 93 e 91% para o tratamento T2, de 96 e 96% para o tratamento T3, de 94 e 94% para o tratamento T4 e de 95 e 75% para o tratamento T5. Sendo assim, constatou-se que as reduções nos valores de CUD das subunidades submetidas aos tratamentos T2 e T5 foram de 2,20 e 21,05%, enquanto que na subunidade submetida ao tratamento T1 ocorreu elevação dos valores da ordem de 5,49%. Os valores médios de CUD permaneceram constantes para as subunidades submetidas aos tratamentos T3 e T4.

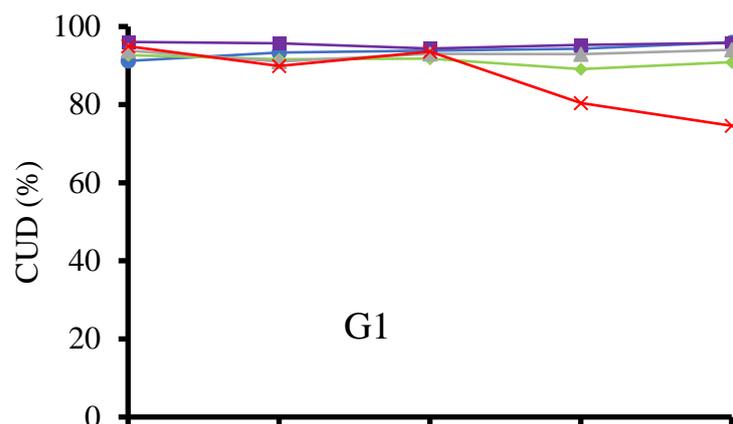
De acordo com os critérios estabelecidos por Merriam & Keller (1978), os valores médios do CUD para o gotejador G1 foram maiores que 90%, sendo classificados como excelentes nos tempos de operação inicial e final, exceto quando submetido ao tratamento T5, que obteve classificação regular (entre 70 e 80%) no tempo de operação de 160 h.

Para o gotejador G2 (Figura 13B), nos tempos de funcionamento inicial e final (160 h), os valores médios de CUD foram de 87 e 83%, de 91 e 92%, de 92 e 87%, de 93 e 73% e de 96 e 26% nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. Dessa forma, ocorreram reduções nos valores de CUD de 4,60, 5,43, 21,51 e 72,92% nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T3, T4 e T5, respectivamente, enquanto que para a subunidade submetida ao tratamento T2 ocorreu um discreto aumento de 1,10%.

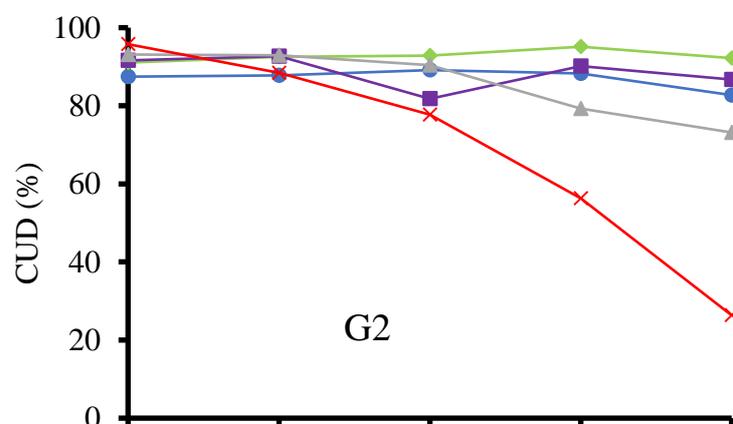
Os valores médios do CUD para o gotejador G2, no tempo de operação inicial (0 h), foram classificados como bom (entre 80 e 90%) quando submetido ao tratamento T1 e como excelentes quando submetidos aos demais tratamentos, pois foram maiores que 90%. No tempo de operação de 160 h, os valores médios do CUD receberam a classificação excelente (> 90%) no tratamento T2, boa nos tratamentos T1 e T3, regular no tratamento T4 e ruim no tratamento T5 (Merriam & Keller, 1978).

O gotejador G3 (Figura 13C) apresentou valores médios de CUD iguais a 94 e 94% para o tratamento T1, de 95 e 95% para o tratamento T2, de 95 e 92% para o tratamento T3, de 92 e 82% para o tratamento T4 e de 92 e 83% para o tratamento T5, quando comparados os tempos de funcionamento de 0 e 160 h. Dessa forma, ocorreram reduções nos valores médios de CUD apenas para as subunidades submetidas aos tratamentos T3, T4 e T5, sendo estas iguais a 3,16, 10,87 e 9,78%, respectivamente.

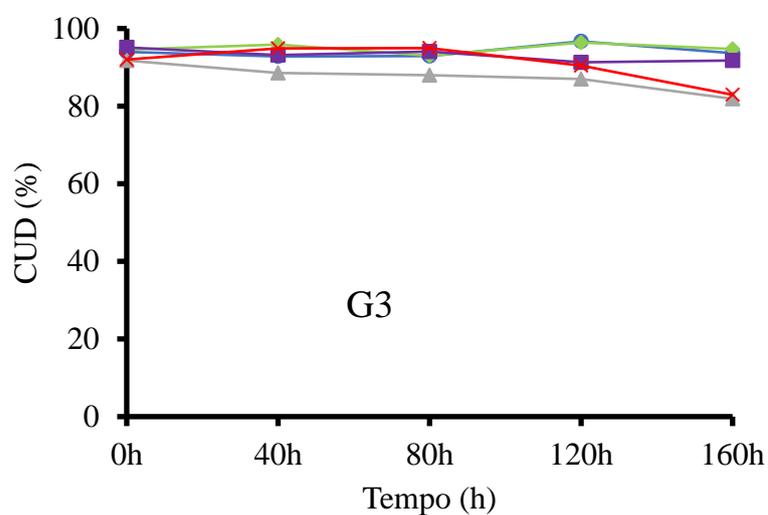
A.



B.



C.



—●— T1 —◆— T2 —■— T3 —▲— T4 —×— T5

Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 13. Gráficos do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Conforme Merriam & Keller (1978), os valores médios de CUD para o gotejador G3 foram maiores que 90% no tempo de operação inicial (0 h), sendo classificados como excelentes em todos os tratamentos; enquanto que, no tempo de operação final, os valores médios de CUD foram classificados como excelentes (> 90%) para os tratamentos T1, T2 e T3 e como bons para os tratamentos T4 e T5 (entre 80 e 90%).

Batista et al. (2013b) notaram reduções nos valores de CUD de até 87%, sendo esta observada para o gotejador G1 (2,00 L h⁻¹) na subunidade submetida ao manejo 2E2A (duas horas de aplicação de efluente da suinocultura seguidas de duas horas de aplicação com água de abastecimento). No trabalho conduzido por Puig-Bargués et al. (2010), com água residuária tratada, foram constatadas reduções nos valores de CUD de 95,1% para 76,0%, após 1620 h de operação das unidades de irrigação por gotejamento.

Encontram-se, na Tabela 14, as equações de regressão ajustadas à variável CUD em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos avaliados (T1, T2, T3, T4 e T5), apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R²).

Tabela 14. Equações de regressão ajustadas à variável CUD em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R ²
CUD			
T1	G1	$\overline{CUD} = 91,619 + 0,0265^{**}T$	0,93
	G2	$\overline{CUD} = 86,896 - 0,000623^{*}T^2 + 0,0770^0T$	0,87
	G3	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 94,005$	-
T2	G1	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 91,222$	-
	G2	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 92,765$	-
	G3	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 94,916$	-
T3	G1	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 95,446$	-
	G2	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 88,597$	-
	G3	$\overline{CUD} = \overline{CUD} = 93,087$	-
T4	G1	$\overline{CUD} = 93,741 - 0,688^0T^{1/2} + 0,0572^0T$	0,80
	G2	$\overline{CUD} = 96,513 - 0,134^{**}T$	0,88
	G3	$\overline{CUD} = 91,676 - 0,0530^{**}T$	0,88
T5	G1	$\overline{CUD} = 96,726 - 0,126^{*}T$	0,81
	G2	$\overline{CUD} = 94,989 + 4,549^0T^{1/2} - 0,768^{*}T$	0,98
	G3	$\overline{CUD} = 91,927 - 0,00113^{**}T^2 + 0,125^{**}T$	1,00

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Pode-se verificar que o menor valor (29,65%) de CUD ocorreu para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5, enquanto o maior valor (95,86%) foi constatado para o gotejador G1 submetido ao tratamento T1, após 160 h de operação do sistema.

Evidenciou-se que o modelo raiz quadrada expressou melhor a relação entre os dados de CUD e T para o gotejador G1 submetido ao tratamento T4 e para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5, sendo os R^2 iguais a 0,80 e 0,98, respectivamente. Semelhantemente, Vale et al. (2018b) relataram que o modelo de regressão raiz quadrada se ajustou melhor aos dados de CUD e ao tempo de operação na subunidade de irrigação com gotejador G2, operando com percolado de aterro sanitário diluído, sob pressão de serviço de 210 kPa, durante 160 h.

Já o modelo quadrático ajustou-se melhor aos valores de CUD, em função de T, para o gotejador G2 submetido ao tratamento T1 e para o gotejador G3 submetido ao tratamento T5, com valor de R^2 de 0,87 e 1,00, respectivamente.

Houve relação linear entre o CUD e o T para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1 e T5, para o gotejador G2 submetido ao T4 e para o gotejador G3 submetido ao T4, apresentando valores de R^2 variando de 0,81 a 0,93.

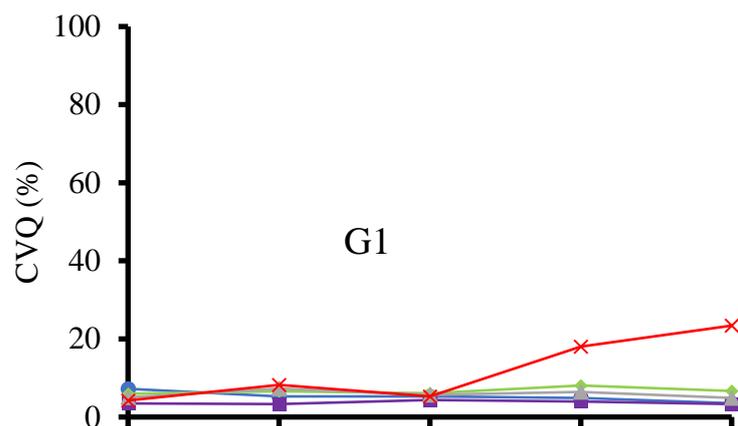
Para o gotejador G3 submetido ao tratamento T1 e para os gotejadores G1, G2 e G3 submetidos aos tratamentos T2 e T3, não houve efeito significativo do T sobre os dados de CUD, indicando que a média foi o que melhor se ajustou aos dados.

Trabalhando com água residuária da castanha do caju, Silva et al. (2016) mencionaram que os modelos de regressão linear e raiz quadrada ajustaram 17% das combinações, cada um, entre três modelos de gotejadores e quatro pressões de serviço; enquanto que a média foi a melhor representação para as demais combinações, indicando maior resistência ao entupimento.

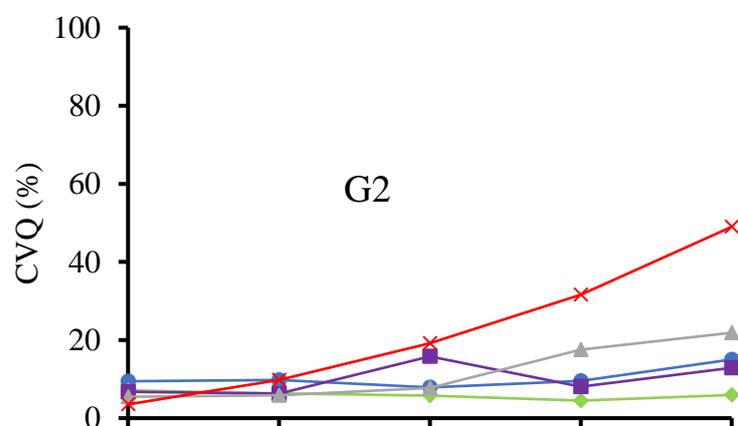
4.1.2.5 Coeficiente de variação de vazão (CVQ)

A Figura 14 apresenta os valores médios referentes ao CVQ, ao longo do tempo de operação das subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

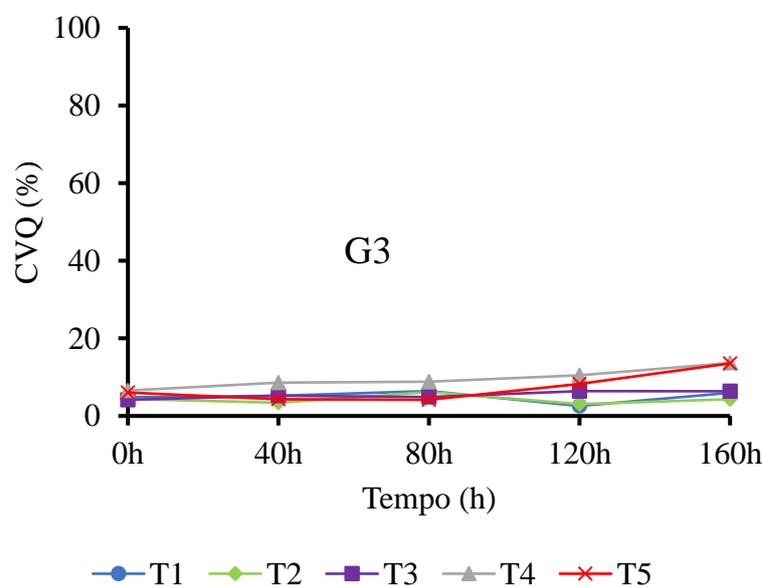
A.



B.



C.



Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 14. Gráficos do coeficiente de variação de vazão (CVQ) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Comparando os tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h), evidenciou-se nas subunidades com gotejador G1 (Figura 14A), submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, que os valores médios de CVQ foram de 7 e 4%, 6 e 7%, 3 e 3%, 5 e 5% e 4 e 23%, respectivamente. De acordo com a norma ASAE EP 405 (ASABE, 2008), notou-se que os valores médios de CVQ foram menores que 10%, sendo classificados como bons; exceto para a subunidade submetida ao tratamento T5, no tempo de operação de 160 h, que apresentou valor médio de CVQ maior que 20%, sendo classificado como inaceitável.

Para o gotejador G2 (Figura 14B), nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, os valores médios de CVQ foram de 9 e 15% na subunidade submetida ao tratamento T1, de 7 e 6% na subunidade submetida ao T2, de 7 e 13% na subunidade submetida ao T3, de 5 e 22% na subunidade submetida ao T4 e de 4 e 49% na subunidade submetida ao T5.

Dessa forma, para o gotejador G2, os valores médios de CVQ receberam a classificação boa no tempo de operação inicial (0 h), pois foram menores que 10%; enquanto que, no tempo de operação final, os valores médios foram classificados como bom (< 10%) no tratamento T2, razoáveis (entre 10 e 20%) nos tratamentos T1 e T3 e inaceitáveis (> 20%) nos tratamentos T4 e T5 (ASABE, 2008).

Com relação ao gotejador G3 (Figura 14C), ao comparar os tempos de operação 0 e 160 h, verificou-se que os valores médios de CVQ foram iguais a 5 e 6%, 4 e 4%, 4 e 6%, 7 e 14% e 6 e 14% nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. Conforme classificação da ASABE (2008), os valores médios de CVQ foram considerados bons (< 10%) no tempo de operação inicial; entretanto, no tempo de operação de 160 h, foram classificados como bons para as subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2 e T3 e como razoáveis (entre 10 e 20%) para as subunidades submetidas aos tratamentos T4 e T5.

Batista et al. (2016), analisando os efeitos de pressões de serviço no CVQ de unidades gotejadoras aplicando água residuária de suinocultura, constataram que, ao final do experimento (160 h), todos os valores médios de CVQ foram maiores que 20%, recebendo a classificação inaceitável; exceto para o gotejador G3 ($3,60 \text{ L h}^{-1}$) submetido a pressão de serviço de 215 kPa, em que o valor médio encontrou-se na faixa limite de 10 a 20% estabelecida pela ASABE (2008), recebendo classificação razoável.

Na Tabela 15 estão apresentadas as equações de regressão ajustadas à variável CVQ, em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras, para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos avaliados (T1, T2, T3, T4 e T5), apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R^2).

Após 160 h de operação do sistema, o menor (3,68%) e o maior (45,19%) valor de CVQ foram observados para o gotejador G1 submetido ao tratamento T3 e para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5, respectivamente.

Os dados do CVQ em função de T mostraram que o modelo de regressão linear apresentou melhor ajuste para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1 e T5, para o gotejador G2 submetido aos tratamentos T4 e T5 e para o gotejador G3 submetido aos tratamentos T3 e T4, com R² variando de 0,81 a 0,96. Já o modelo quadrático foi o que melhor representou a relação entre CVQ e T para o gotejador G3 submetido ao tratamento T5, com R² igual a 0,99.

Nas demais combinações entre os tipos de gotejadores e os tratamentos, observou-se que a média foi o que melhor se ajustou à relação entre os dados de CVQ e T, indicando maior resistência ao entupimento.

Tabela 15. Equações de regressão ajustadas à variável CVQ em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R ²
CVQ			
T1	G1	$\widehat{CVQ} = 6,807 - 0,0195 \cdot T$	0,87
	G2	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 10,324$	-
	G3	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 4,987$	-
T2	G1	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 6,672$	-
	G2	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 5,914$	-
	G3	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 4,267$	-
T3	G1	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 3,683$	-
	G2	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 9,968$	-
	G3	$\widehat{CVQ} = 4,281 + 0,0140 \cdot T$	0,83
T4	G1	$\widehat{CVQ} = \overline{CVQ} = 5,961$	-
	G2	$\widehat{CVQ} = 2,796 + 0,111 \cdot T$	0,88
	G3	$\widehat{CVQ} = 6,401 + 0,0401 \cdot T$	0,92
T5	G1	$\widehat{CVQ} = 2,200 + 0,120 \cdot T$	0,81
	G2	$\widehat{CVQ} = 0,0747 + 0,282 \cdot T$	0,96
	G3	$\widehat{CVQ} = 6,105 + 0,000817 \cdot T^2 - 0,0835 \cdot T$	0,99

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Em trabalho realizado por Batista et al. (2016) com gotejadores aplicando água residuária de suinocultura, os modelos de regressão quadrático, raiz quadrada, hiberbólico e linear foram os que melhor se ajustaram a relação entre o CVQ e o tempo de operação das unidades de irrigação, para as combinações entre modelos de gotejadores e pressões de serviço.

4.1.2.6 Coeficiente de uniformidade estatística (Us)

Na Figura 15 estão apresentados os gráficos da variável Us, ao longo do tempo de operação do sistema, nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1, G2 e G3, submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

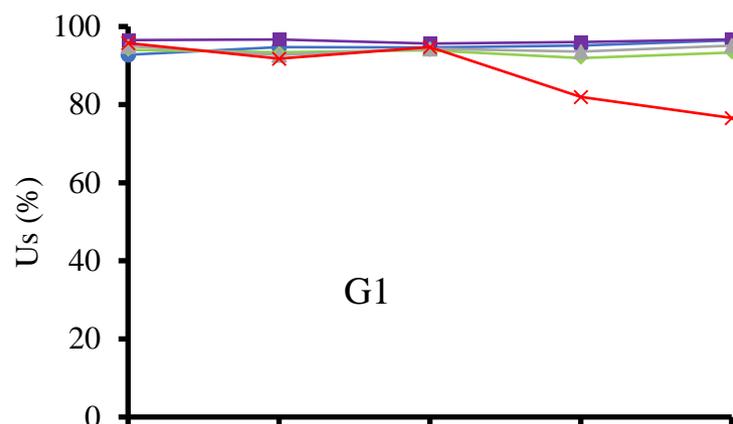
Estabelecendo comparação entre os tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h), constatou-se para o gotejador G1 (Figura 15A) que os valores médios de Us foram de 93 e 96%, 94 e 93%, 97 e 97%, 95 e 95%, 96 e 77%, para as subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5, respectivamente. Seguindo a classificação proposta por Mantovani (2002), pode-se verificar que os valores médios de Us foram classificados como excelentes (> 90%) nos tempos de operação inicial e final.

Para o gotejador G2 (Figura 15B), nos tempos de operação inicial e 160 h, os valores médios de Us foram de 91 e 85% para a subunidade submetida ao tratamento T1, de 93 e 94% para a subunidade submetida ao tratamento T2, de 93 e 87% para a subunidade submetida ao tratamento T3, de 95 e 78% para a subunidade submetida ao tratamento T4 e de 96 e 51% para a subunidade submetida ao tratamento T5. Dessa forma, no tempo de operação inicial (0 h), os valores médios de Us do gotejador G2 foram classificados como excelentes; entretanto, no tempo de operação de 160 h, os valores médios de Us receberam a classificação excelente (> 90%) no tratamento T2, boa (entre 80 e 90%) nos tratamentos T1 e T3, razoável (entre 70 e 80%) no tratamento T4 e inaceitável (< 60%) no tratamento T5 (Mantovani, 2002).

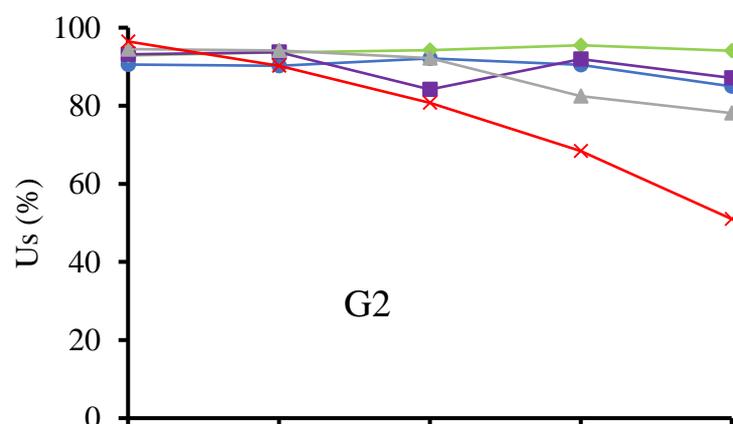
Ao comparar os tempos de operação de 0 e 160 h, notou-se que os valores médios de Us, para o gotejador G3 (Figura 15C), nas subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5 foram de 95 e 94%, 96 e 96%, 96 e 94%, 93 e 86%, 94 e 86%, respectivamente. Conforme classificação estabelecida por Mantovani (2002), os valores médios de Us nos tempos de operação inicial e final foram maiores que 90%, sendo classificados como excelentes; exceto para as subunidades submetidas aos tratamentos T4 e T5, no tempo de operação de 160 h, em que os valores médios encontraram-se dentro da faixa limite de 80 a 90%, sendo classificados como bons.

Batista et al. (2011a) notaram redução média de Us de 54, 24 e 59%, em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando água residuária doméstica primária, secundária e terciária, respectivamente, após 500 h de operação.

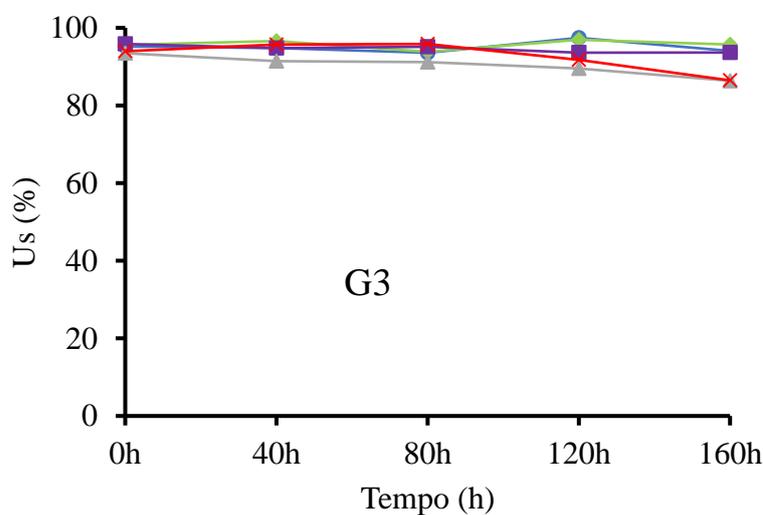
A.



B.



C.



—●— T1 —◆— T2 —■— T3 —▲— T4 —×— T5

Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 15. Gráficos de uniformidade estatística (Us) em função do tempo de operação nas subunidades gotejadoras dotadas dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C), aplicando diluições de água produzida tratada

Encontram-se, na Tabela 16, as equações de regressão ajustadas à variável CVQ em função dos tempos de operação (T) das unidades gotejadoras para os três tipos de emissores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos avaliados (T1, T2, T3, T4 e T5), apresentando os respectivos coeficientes de determinação (R^2).

Tabela 16. Equações de regressão ajustada a variável U_s em função dos tempos de operação (T) das unidades de irrigação para os três tipos de gotejadores (G1, G2 e G3) e os cinco tratamentos (T1, T2, T3, T4, T5) avaliados

Tratamento	Gotejador	Equação de regressão	R^2
U_s			
T1	G1	$\widehat{U}_s = 93,193 + 0,0195*T$	0,87
	G2	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 89,676$	-
	G3	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 95,013$	-
T2	G1	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 93,328$	-
	G2	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 94,086$	-
	G3	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 95,733$	-
T3	G1	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 96,317$	-
	G2	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 90,032$	-
	G3	$\widehat{U}_s = 95,719 - 0,0140*T$	0,83
T4	G1	$\widehat{U}_s = \overline{U}_s = 94,039$	-
	G2	$\widehat{U}_s = 97,204 - 0,111**T$	0,88
	G3	$\widehat{U}_s = 93,599 - 0,0401**T$	0,92
T5	G1	$\widehat{U}_s = 97,800 - 0,120*T$	0,81
	G2	$\widehat{U}_s = 99,925 - 0,282**T$	0,96
	G3	$\widehat{U}_s = 93,895 - 0,000817**T^2 + 0,0835*T$	0,99

Nota: **, * e ⁰ significativo a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Constatou-se, nessa tabela, que após 160 h de operação do sistema, o menor (54,81%) valor de U_s ocorreu para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5 e o maior valor (96,32%) foi obtido para o gotejador G1 submetido ao tratamento T3.

O modelo de regressão linear foi o que melhor se adequou à relação entre os dados de U_s e T para o gotejador G1 submetido aos tratamentos T1 e T5, para o gotejador G2 submetido aos tratamentos T4 e T5 e para o gotejador G3 submetido aos tratamentos T3 e T4, apresentando valores de R^2 oscilando de 0,81 a 0,96. Batista et al. (2011a) também encontraram relação linear para os dados de U_s e o tempo de operação, em conjuntos de irrigação por gotejamento operando com águas residuárias domésticas primárias e terciárias.

Para o gotejador G3 submetido ao tratamento T5, o modelo de regressão que melhor se ajustou foi o quadrático, sendo o valor de R^2 de 0,99. Não houve efeito significativo de T, sobre os valores de U_s , para as demais combinações entre tipos de gotejadores e tratamentos, sendo a média a melhor representação dos dados.

Batista et al. (2016) constataram que os modelos de regressão linear, raiz quadrada e quadrático ajustaram-se melhor à relação entre os dados de Us e o tempo de operação para unidades de irrigação por gotejamento com três tipos de emissores, operando com efluente da suinocultura sob pressões de serviço de 70, 140, 210 e 280 kPa, durante 160 h.

Os resultados de desempenho hidráulico indicaram que o gotejador G2, submetido ao tratamento T5, foi mais suscetível ao entupimento do que os gotejadores G1 e G3, devido, provavelmente, a sua menor área de filtração (Tabela 8) e a formação de incrustação sobre a mesma, o que dificultou a entrada de efluente pelas pequenas aberturas, acarretando, assim, redução na vazão ao longo das linhas laterais e, conseqüentemente, alterando a uniformidade de aplicação do sistema. Comportamento semelhante foi observado por Batista et al. (2017), ao analisar a dinâmica de obstrução de gotejadores operando com água residuária de suinocultura.

Além disso, o maior nível de obstrução no gotejador G2 pode estar associado, parcialmente, ao menor comprimento do labirinto, conforme relatado por Liu & Huang (2009). Esses autores concluíram que o gotejador com menor labirinto e menor vazão, apresentou maior suscetibilidade ao entupimento. Resultados contrários foram observados por Silva et al. (2013) e Mesquita et al. (2016a) onde, provavelmente, o maior comprimento de labirinto favoreceu o desenvolvimento de biofilme nos gotejadores.

O gotejador G3, quando submetido aos tratamentos T1 (100% AS) ao T3 (80% AS e 20% AP), ou seja, operando com proporções de água produzida tratada de até 20%, foi o que apresentou melhor atenuação ao entupimento.

Avaliando o efeito da aplicação de diluições de água produzida tratada em água de abastecimento na cultura do girassol (*Heliantus annuus* L.), Costa (2018) observou que o tratamento T2, com 75% de água de abastecimento e 25% de água produzida tratada, proporcionou os melhores resultados quanto ao desenvolvimento da cultura.

Dessa forma, pode-se considerar o tratamento T3 como ideal para a aplicação de água produzida tratada diluída via sistema de irrigação por gotejamento, levando-se em consideração a cultura do girassol.

4.1.3 Vazão dos gotejadores (Q) ao longo das linhas laterais operando com diluições de água produzida tratada

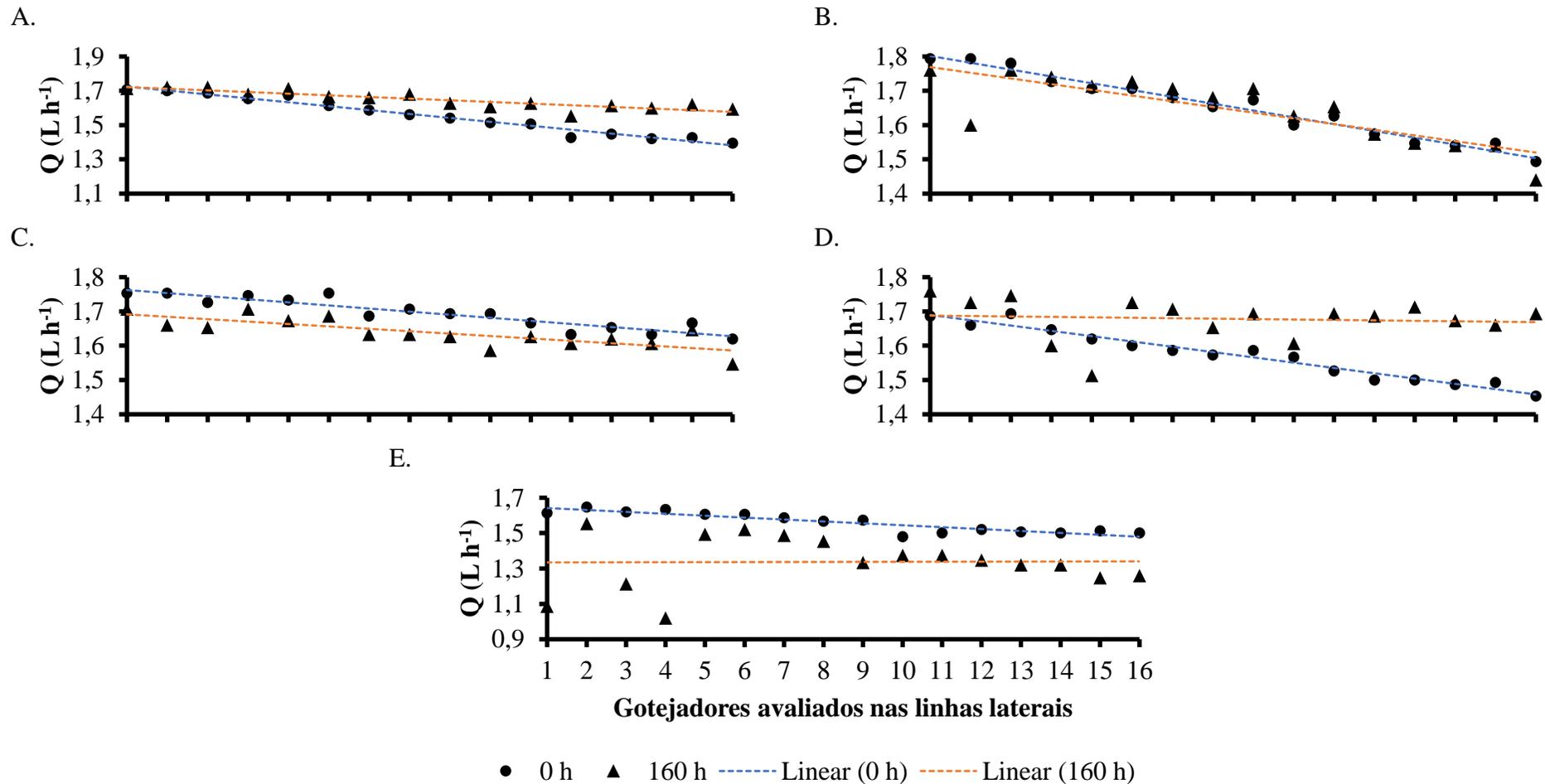
A Figura 16 apresenta os valores médios de Q ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial (0h) e final (160 h), nas subunidades de irrigação dotadas do gotejador G1 submetidas aos tratamentos T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

Observando os tratamentos T1 (Figura 16A) e T4 (Figura 16D) verificou-se que ocorreu aumento de Q do gotejador G1 ao longo das linhas laterais, quando se estabeleceu comparação entre os tempos de operação inicial (0) e final (160 h); enquanto que, para os tratamentos T3 (Figura 16C) e T5 (Figura 16E) houve redução de Q . Quando submetido ao tratamento T2 (Figura 16B), o gotejador G1 apresentou redução de Q no segmento inicial e aumento de Q no segmento final da linha lateral.

O aumento de vazão ao longo da linha lateral pode ser atribuído as alterações nos orifícios dos gotejadores, provocadas devido à pressão exercida por partículas sólidas que vão se acumulando nestes pontos, alterando o seu formato normal de fábrica. Na medida em que estas partículas, devido ao regime turbulento do fluido, deixam de interromper a passagem do efluente, o volume que passa pelo emissor em um mesmo intervalo de tempo torna-se maior.

Notou-se que os níveis de obstrução foram mais acentuados no seguimento inicial das linhas laterais das subunidades com gotejador G1, submetidas aos tratamentos T4 e T5. Quando submetido aos demais tratamentos (T1, T2 e T3), o gotejador G1 apresentou entupimento aleatoriamente distribuído ao longo da linha lateral.

Esse resultado difere dos apresentados por Ravina et al. (1992) e Capra & Scicolone (1998) que constataram maior ocorrência de entupimento no seguimento final da linha lateral, em condições experimentais diferentes das encontradas no presente trabalho.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 16. Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G1 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS (A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas

Na Tabela 17 estão apresentadas as equações de regressão que relacionam a vazão do gotejador G1 e a posição dos gotejadores avaliados ao longo das linhas laterais, nos tempos de operação inicial (0h) e final (160h).

Tabela 17. Equações de regressão da vazão do gotejador G1, em L h⁻¹, sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h)

Tempo de Operação (h)	Gotejador	Tratamento	Equação de regressão	R ²
0	G1	T1	$\hat{Q} = 1,748 - 0,0229^{**}NG$	0,97
		T2	$\hat{Q} = 1,821 - 0,0199^{**}NG$	0,97
		T3	$\hat{Q} = 1,771 - 0,00900^{**}NG$	0,86
		T4	$\hat{Q} = 1,705 - 0,0155^{**}NG$	0,96
		T5	$\hat{Q} = 1,653 - 0,0108^{**}NG$	0,82
160	G1	T1	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,650$	-
		T2	$\hat{Q} = 1,693 - 0,00182^{**}NG^2 + 0,0143^0NG$	0,82
		T3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,639$	-
		T4	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,678$	-
		T5	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,337$	-

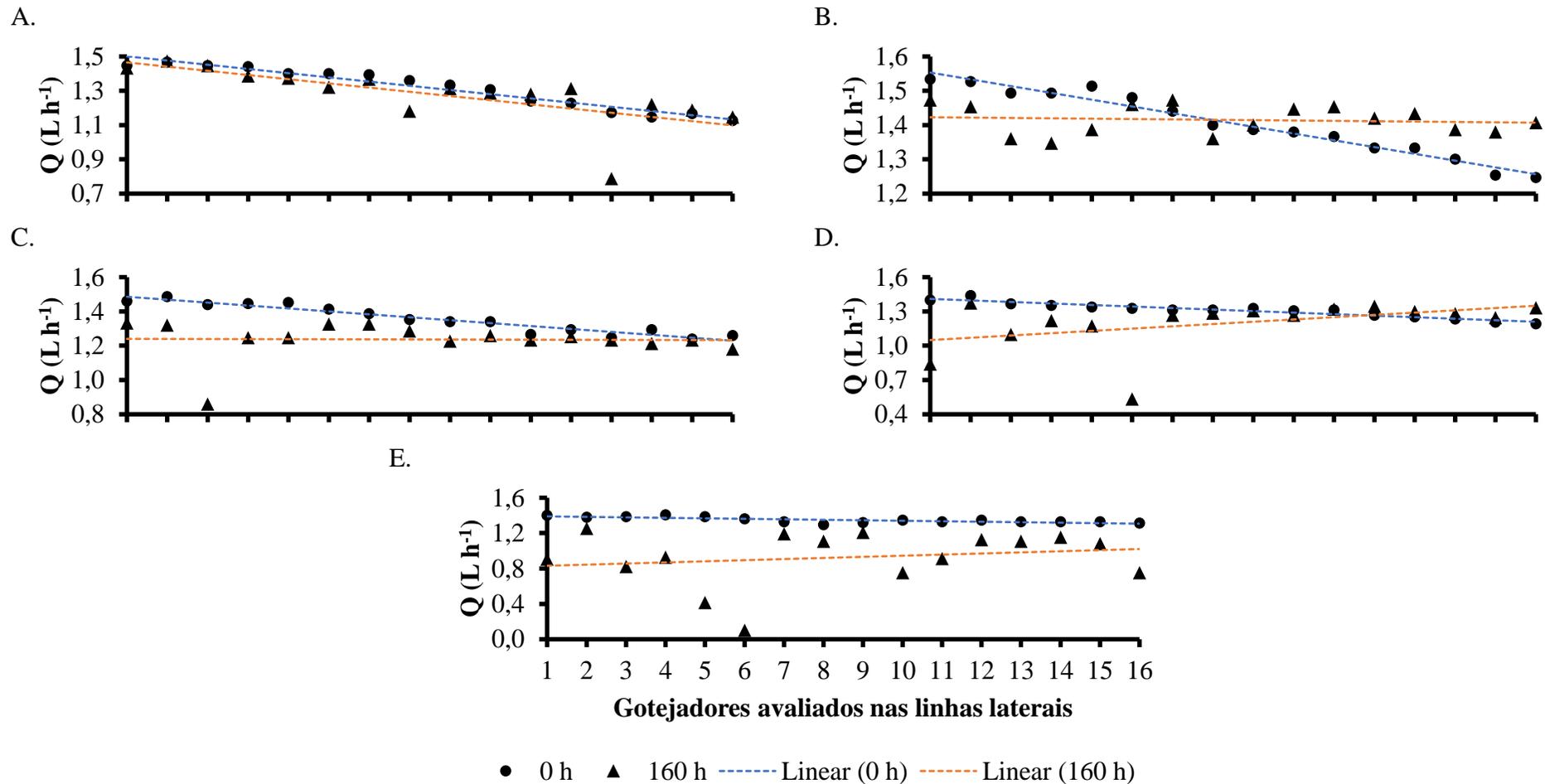
Nota: **, * e ⁰ Significativos a 1, 5 e 10% de probabilidade pelo teste t, respectivamente.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Notou-se, nessa tabela, no tempo de operação inicial, que houve relação linear significativa entre os dados de vazão do gotejador G1 e a posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais, para todos os tratamentos, apresentando valores de coeficiente de determinação (R²) variando de 0,82 a 0,97.

No tempo de operação final (160 h), o modelo quadrático ajustou-se melhor aos dados de vazão, em função da posição dos gotejadores, para o gotejador G1 submetido ao tratamento T2, tendo R² igual a 0,82. Nos demais tratamentos não houve alteração significativa da vazão dos gotejadores em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais, indicando que o processo de obstrução está relacionado diretamente ao fator tempo de operação das subunidades de irrigação, conforme verificado nos estudos desenvolvidos por Batista et al. (2008) com efluente doméstico terciário, Batista et al. (2014b) com efluente suíno e Silva et al. (2014) com efluente do processamento da castanha de caju.

Constam, na Figura 17, os valores médios de Q ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial (0h) e final (160 h), nas subunidades de irrigação dotadas do gotejador G2 submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 17. Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G2 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS (A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas

Ao estabelecer comparação entre os tempos de operação inicial e final (160 h), foi possível constatar que houve redução de Q ao longo das linhas laterais, nas subunidades com gotejador G2 submetidas aos tratamentos T1 (Figura 17A), T3 (Figura 17C) e T5 (Figura 17E); ao passo que, quando submetido aos tratamentos T2 (Figura 17B) e T4 (Figura 17D) o gotejador G2 apresentou redução de Q no segmento inicial e aumento de Q no segmento final da linha lateral.

Esse resultado assemelha-se, em parte, ao obtido por Batista et al. (2017) que verificou redução na vazão dos gotejadores G1 (2,0 L h⁻¹), G2 (1,7 L h⁻¹) e G3 (3,6 L h⁻¹), ao longo das linhas laterais das unidades de irrigação operando nas pressões de serviço P1 (75 kPa), P2 (145 kPa), P3 (215 kPa) e P4 (285 kPa), quando se estabeleceu comparação entre os tempos de funcionamento inicial (0) e final (160 h).

Percebeu-se a predominância de entupimento pontual no final das linhas laterais da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T1; enquanto que, nas subunidades submetidas aos demais tratamentos (T2, T3, T4 e T5), os níveis de obstrução foram mais intensos nos segmentos inicial e médio das linhas laterais.

Apresentam-se, na Tabela 18, as equações de regressão que relacionam a vazão do gotejador G2 e a posição dos gotejadores avaliados ao longo das linhas laterais, nos tempos de operação inicial (0h) e final (160h).

Tabela 18. Equações de regressão da vazão do gotejador G2, em L h⁻¹, sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h)

Tempo de Operação (h)	Gotejador	Tratamento	Equação de regressão	R ²
0	G2	T1	$\hat{Q} = 1,526 - 0,0246^{**}NG$	0,95
		T2	$\hat{Q} = 1,573 - 0,0198^{**}NG$	0,97
		T3	$\hat{Q} = 1,503 - 0,0171^{**}NG$	0,92
		T4	$\hat{Q} = 1,423 - 0,0134^{**}NG$	0,91
		T5	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,348$	-
160	G2	T1	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,282$	-
		T2	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,415$	-
		T3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,236$	-
		T4	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,200$	-
		T5	$\hat{Q} = \bar{Q} = 0,926$	-

Nota: ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

No tempo de operação inicial, verificou-se que ocorreu relação linear entre os dados de vazão dos gotejadores e a posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais para os tratamentos T1, T2, T3 e T4, apresentando valores de R² iguais a 0,95, 0,97, 0,92 e 0,91, respectivamente; à medida que, para o tratamento T5 não houve alteração significativa da vazão ao longo das linhas laterais.

Resultado diferente foi encontrado por Batista et al. (2017), esses autores notaram que, para o tempo de operação inicial, não houve alteração significativa da vazão dos gotejadores G1 ($2,0 \text{ L h}^{-1}$), G2 ($1,7 \text{ L h}^{-1}$) e G3 ($3,6 \text{ L h}^{-1}$), em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais, para as doze combinações entre tipos de gotejadores e pressões de serviço.

No tempo de operação final (160 h), observou-se que a média ajustou-se melhor aos dados de vazão do gotejador G2, em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais, para todos os tratamentos, indicando maior resistência à obstrução nessas condições.

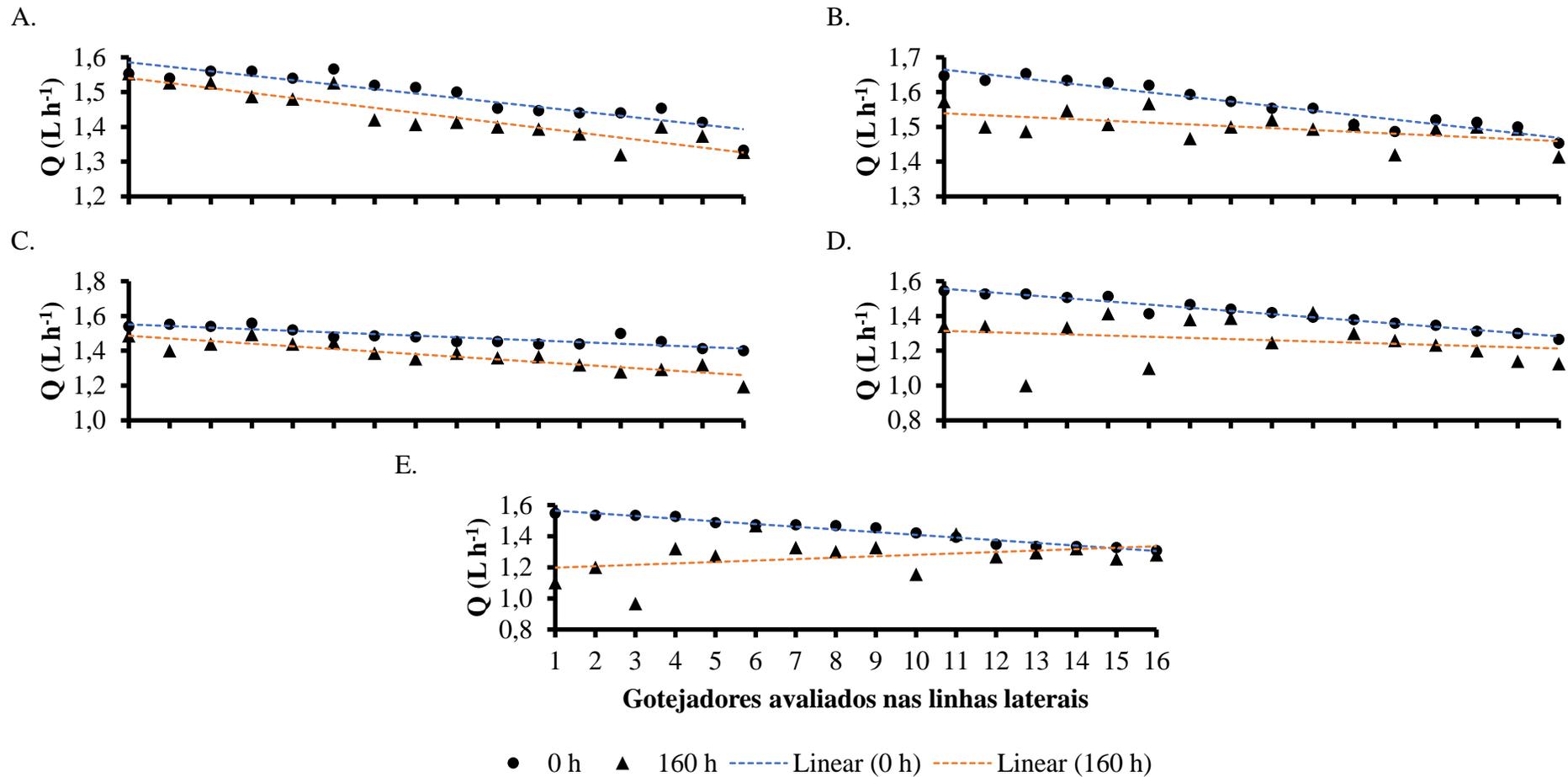
Na Figura 18 estão apresentados os valores médios de Q ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial (0h) e final (160 h), nas subunidades de irrigação dotadas do gotejador G3 submetidas aos tratamentos T1, T2, T3, T4 e T5.

Verificou-se que houve redução na Q do gotejador G3, ao longo das linhas laterais das subunidades de irrigação submetidas aos tratamentos T1 (Figura 18A), T2 (Figura 18B), T3 (Figura 18C), T4 (Figura 18D) e T5 (Figura 18E), quando se estabeleceu comparação entre os tempos de funcionamento inicial e final (160 h). Porém, no tratamento T5 ocorreu um discreto aumento de vazão no final da linha lateral.

Para o gotejador G3 submetido aos tratamentos T1, T2 e T3, foi constatado entupimento parcial aleatório ao longo das linhas laterais, sendo mais acentuado no seguimento final; à medida que, quando submetido aos tratamentos T4 e T5, os níveis de obstrução do gotejador G3 foram mais expressivos no segmento inicial e médio das linhas laterais.

Níveis de obstrução mais acentuados no segmento final das linhas laterais ocorrem, provavelmente, devido a menor velocidade de escoamento do efluente, favorecendo a sedimentação de partículas orgânicas e inorgânicas e, posteriormente, o surgimento de mucilagens microbianas que passaram a aglomerar o material sedimentado, formando a incrustação e reduzindo a Q.

Ao analisar a dinâmica de obstrução de gotejadores, ao longo de linhas laterais, operando com água residuária de suinocultura sob pressões de serviço, Batista et al. (2017) constatou que os gotejadores G1 (não autocompensante, 2 L h^{-1}), G2 (não autocompensante, $1,7 \text{ L h}^{-1}$) e G3 (autocompensante, $3,60 \text{ L h}^{-1}$) apresentaram maiores níveis de obstrução no segmento final das linhas laterais.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 18 - Valores médios de vazão (Q) ao longo da linha lateral, nos tempos de funcionamento inicial e 160 h, nas subunidades com gotejador G3 submetidas aos tratamentos T1 = 100% AS (A), T2 = 90% AS e 10% AP (B), T3 = 80% AS e 20% AP (C), T4 = 70% AS e 30% AP (D) e T5 = 60% AS e 40% AP (E), operando diariamente por quatro horas

As equações de regressão que relacionam a vazão do gotejador G3 e a posição dos gotejadores avaliados ao longo das linhas laterais, nos tempos de operação inicial (0h) e final (160h), estão apresentadas na Tabela 19.

Tabela 19. Equações de regressão da vazão do gotejador G3, em L h⁻¹, sobre diferentes tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) em função da posição dos gotejadores, avaliados ao longo das linhas laterais (NG), nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h)

Tempo de Operação (h)	Gotejador	Tratamento	Equação de regressão	R ²
0	G3	T1	$\hat{Q} = 1,598 - 0,0128^{**}NG$	0,84
		T2	$\hat{Q} = 1,678 - 0,0131^{**}NG$	0,92
		T3	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,482$	-
		T4	$\hat{Q} = 1,575 - 0,0182^{**}NG$	0,96
		T5	$\hat{Q} = 1,582 - 0,0173^{**}NG$	0,96
160	G3	T1	$\hat{Q} = 1,555 - 0,0143^{**}NG$	0,85
		T2	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,499$	-
		T3	$\hat{Q} = 1,501 - 0,0151^{**}NG$	0,80
		T4	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,264$	-
		T5	$\hat{Q} = \bar{Q} = 1,266$	-

Nota: ** Significativo a 1% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Verificou que, no tempo de operação inicial, para o gotejador G3 submetido aos tratamentos T1, T2, T4 e T5, o modelo linear ajustou-se melhor à relação entre os dados de vazão e a posição dos gotejadores ao longo da linha, tendo R² oscilando de 0,84 a 0,96. Para o gotejador G3 submetido ao tratamento T3, a média foi o que melhor se ajustou aos dados de vazão em função da posição dos gotejadores ao longo da linha lateral.

Em condições experimentais diferentes, Oliver et al. (2014) obtiveram, apenas, relações lineares entre os dados de vazão dos gotejadores e a posição dos mesmos ao longo das linhas laterais, apresentando valores de coeficientes de determinação variando de 0,63 a 0,85.

No tempo de operação final (160 h), ocorreu relação linear entre os dados de vazão do gotejador G3 e a posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais, quando submetido aos tratamentos T1 e T3, apresentando R² iguais a 0,85 e 0,80, respectivamente. Para os demais tratamentos (T2, T4 e T5) não houve alteração significativa da vazão do gotejador G3 em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas, indicando que não ocorreu efeito da obstrução nessas condições.

Analisando, de modo geral, os gotejadores G1 (Figura 16), G2 (Figura 17) e G3 (Figura 18) ao longo das linhas laterais, nos tempos de operação inicial (0 h) e final (160 h), pode-se constatar que os maiores níveis de obstrução foram verificados para o gotejador G2 submetido ao tratamento T5.

Vale ressaltar que a vazão dos gotejadores G1 (Tabela 17), G2 (Tabela 18) e G3 (Tabela 19) foi alterada significativamente pela posição dos mesmos ao longo da linha lateral,

principalmente no tempo de operação inicial (0); enquanto que, no tempo de operação final (160 h) a posição dos gotejadores pouco interferiram na vazão, indicando que o processo de obstrução está relacionado diretamente ao fator tempo de operação das subunidades de irrigação.

4.1.4 Análise de variância dos indicadores de desempenho hidráulico das unidades gotejadoras operando com diluições de água produzida tratada

A Tabela 20 apresenta o resumo da análise de variância obtida das variáveis Q, CUD, CVQ, Us, QR e RQR das unidades gotejadoras que operaram com diluições de água produzida tratada, durante 160 h.

Tabela 20. Resumo da análise de variância obtida das variáveis Q, CUD, CVQ, Us, QR e RQR das unidades gotejadoras, no esquema de parcelas subdivididas

Fonte de Variação	Grau de Liberdade	Quadrado médio					
		Q	CUD	CVQ	Us	QR	RQR
Diluições do efluente (D)	4	0,21**	881,27**	508,02**	508,02**	0,05**	522,36**
Resíduo (a)	8	0,001	34,03	31,70	31,70	0,0004	4,34
Tipos de gotejadores (G)	2	1,81**	1377,02**	790,12**	790,12**	0,03*	290,87*
D x G	8	0,027**	339,19**	146,51**	146,51**	0,01 ^{ns}	110,80 ^{ns}
Resíduo (b)	20	0,003	55,02	40,67	40,67	0,007	70,70
Tempo de avaliação (T)	4	0,12**	612,04**	364,60**	364,60**	0,06**	561,88**
D x T	16	0,023**	311,08**	162,37**	162,37**	0,01**	110,85**
G x T	8	0,009**	216,08**	106,07**	106,07**	0,005**	52,26**
D x G x T	32	0,005**	98,85**	39,47**	39,47**	0,003**	26,83**
Resíduo (c)	122	0,002	30,52	20,98	20,98	0,001	11,54
Média Geral		1,46	89,58	8,36	91,64	0,97	1,39
CV _{parcela} (%)		2,30	6,51	67,32	6,14	2,11	149,44
CV _{subparcela} (%)		3,72	8,28	76,25	6,96	8,53	603,32
CV _{subsubparcela} (%)		3,36	6,17	54,77	5,00	3,44	243,72

Nota: ** e * significativo a 1 e 5% de probabilidade pelo teste F, respectivamente; ^{ns} não significativo a 5% de probabilidade pelo teste F; Q - vazão; CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição; CVQ - coeficiente de variação da vazão; Us - coeficiente de uniformidade estatística; QR - vazão relativa e RQR - coeficiente de redução da vazão relativa.

Verificou-se que, para todas as variáveis, a interação das diluições do efluente com os tipos de gotejadores, ao longo do tempo de avaliação (D x G x T) foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F. Esse resultado difere do encontrado por Vale et al. (2018b), em que a interação do tempo de operação (T) x pressão de serviço (P) x tipo de gotejador (G) não foi significativa para nenhuma das variáveis estudadas.

Os valores dos coeficientes de variação para as variáveis Q, CUD, CVQ, Us, QR e RQR foram de, aproximadamente, 3, 6, 55, 5, 3 e 244%, respectivamente, indicando que os dados de Q, CUD, Us e QR dos gotejadores foram coletados com alta precisão, visto que foram menores que 10% (Pimentel Gomes, 2009).

Para as variáveis Q, CUD, CVQ e Us, percebeu-se que tanto os fatores isolados (D, G e T) como as interações D x G, D x T e G x T foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F. Já com relação as variáveis QR e RQR, os fatores isolados D e T foram significativos a 1% de probabilidade e o fator isolado G significativo a 5%. Para essas variáveis, a interação D x G não foi significativa, enquanto que as interações D x T e G x T foram significativas a 1% de probabilidade pelo teste F.

Esses resultados diferem, em parte, dos encontrados por Batista et al. (2013a) e Silva et al. (2013), que encontraram significância a 1% de probabilidade para todas as interações e fatores.

4.1.5 Análise das médias dos indicadores de desempenho das unidades gotejadoras aplicando água produzida tratada diluída

4.1.5.1 Análise das médias da vazão dos gotejadores (Q)

Na Tabela 21, apresentam-se os valores médios da variável Q para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento. Constatou-se que houve efeito dos tratamentos sobre a Q, para cada tipo de gotejador, em todos os tempos de funcionamento.

Tabela 21. Valores médios da vazão (Q, em L h⁻¹) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	1,55bA	1,65abA	1,69aA	1,57bA	1,56bA
	G2	1,32aB	1,40aB	1,36aC	1,31aC	1,35aB
	G3	1,49abA	1,57aA	1,48abB	1,42bB	1,44bB
40	G1	1,67abA	1,65abA	1,67abA	1,69aA	1,58bA
	G2	1,36abB	1,45aB	1,34bC	1,36abB	1,39abB
	G3	1,58aA	1,56aA	1,49abB	1,42bB	1,43bB
80	G1	1,66abA	1,69abA	1,64abA	1,69aA	1,58bA
	G2	1,36bC	1,48aB	1,24cC	1,35bcB	1,27bcC
	G3	1,46abB	1,53aB	1,47abB	1,44abB	1,40bB
120	G1	1,63aA	1,63aA	1,60aA	1,66aA	1,41bA
	G2	1,32bC	1,44aB	1,27bcB	1,20cC	1,08dC
	G3	1,51aB	1,51aB	1,36bB	1,31bB	1,29bB
160	G1	1,65aA	1,64aA	1,64aA	1,68aA	1,34bA
	G2	1,28bC	1,41aB	1,24bC	1,20bB	0,93cB
	G3	1,43abB	1,50aB	1,37bcB	1,26dB	1,27cdA

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

As oscilações nos valores de Q , ao longo do tempo de operação do sistema, podem ter ocorrido em razão da desobstrução espontânea devido ao aumento de temperatura durante determinado período, acarretando o desprendimento da incrustação das paredes do labirinto (Cunha et al., 2006), como, também, à sobrelevação da pressão de serviço ocorrida em função da obstrução parcial dos gotejadores, como evidenciado por Faria et al. (2002).

Estabelecendo comparação entre as médias da variável Q seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, observou-se, no tempo de funcionamento inicial (0 h), que a Q da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T3, diferiu da Q das subunidades submetidas aos tratamentos T1, T4 e T5; enquanto a Q da subunidade com gotejador G3, submetida ao tratamento T2, foi diferente da Q das subunidades submetidas aos tratamentos T4 e T5.

No tempo de funcionamento de 40 h os valores de Q das subunidades com gotejador G1, submetidas aos tratamentos T4 e T5, diferiram entre si, assim como os valores de Q das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2 e T3; enquanto que a Q das subunidades com gotejador G3, submetidas aos tratamentos T1 e T2, foi diferente da Q das subunidades submetidas aos tratamentos T4 e T5.

No tempo de funcionamento de 80 h a Q da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T4, diferiu da Q da subunidade submetida ao tratamento T5; os valores de Q das subunidades com G2 submetidas aos tratamentos T1, T2 e T3 diferiram entre si, assim como os valores de Q das subunidades com gotejador G3 submetidas aos tratamentos T2 e T5.

No tempo de funcionamento de 120 h a Q da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiu da Q dos demais tratamentos; os valores de Q das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T1, T2, T4 e T5, diferiram entre si; enquanto a Q das subunidades com gotejador G3, submetidas aos tratamentos T1 e T2, foi diferente da Q das subunidades submetidas aos tratamentos T3, T4 e T5.

No tempo de funcionamento de 160 h a Q da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiu da Q das subunidades submetidas aos demais tratamentos; os valores de Q das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T1, T2 e T5, diferiram entre si, assim como os valores de Q das subunidades com gotejador G3, submetidas aos tratamentos T1 e T5.

Analisando as médias da variável Q seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, constatou-se que no tratamento T1, nos tempos de funcionamento inicial (0h) e de 40 h, a Q da subunidade com gotejador G2 diferiu da Q das subunidades com gotejadores G1 e G3; enquanto nos tempos de funcionamento de 80, 120 e 160 h, os valores de Q das subunidades dos gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si.

No tratamento T2, nos tempos de funcionamento de 0 e 40 h, a Q da subunidade com gotejador G2 foi diferente da Q das subunidades com gotejadores G1 e G3, enquanto que nos tempos de funcionamento de 80, 120 e 160 h, a Q da subunidade com gotejador G1 diferiu da Q das subunidades com gotejadores G2 e G3.

No tratamento T3, no tempo de operação de 120 h, a Q da subunidade com gotejador G1 diferiu da Q das subunidades com gotejadores G2 e G3; nos demais tempos de operação, a Q das subunidades com gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si.

No tratamento T4, nos tempos de funcionamento inicial (0 h) e 120 h, os valores de Q das subunidades com gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si; enquanto nos tempos de funcionamento de 40, 80 e 160 h, a Q da subunidade com gotejador G1 diferiu da Q das subunidades com gotejadores G2 e G3.

No tratamento T5, a Q da subunidade com gotejador G1 diferiu da Q das subunidades com gotejadores G2 e G3, nos tempos de operação de 0 e 40 h; os valores de Q das subunidades com gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si, nos tempos de funcionamento de 80 e 120 h; enquanto a Q da subunidade com gotejador G2 foi diferente da Q das subunidades com gotejadores G1 e G3, no tempo de funcionamento final (160 h).

Mesquita et al. (2016a) observou que com apenas 40 h de funcionamento do sistema, os níveis de entupimento do gotejador G1 (Plastro Hydrodrip Super) começaram a afetar o seu desempenho e, com apenas 20 h de funcionamento, o entupimento alterou o valor médio de vazão das unidades gotejadoras com G4 (Netafim PCJ-CNJ).

4.1.5.2 Análise das médias da vazão relativa (QR)

Constam, na Tabela 22, os valores médios da variável QR para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento. Observa-se, nessa tabela, que não houve efeito dos tratamentos sobre a QR, para cada tipo de gotejador, até o tempo de funcionamento de 40 h.

A QR expressa a razão entre a vazão observada no instante atual e a vazão inicial no instante zero (Dalri et al., 2017). Com a presença de óleos e graxas na água produzida, pode ter ocorrido lubrificação da linha lateral e conseqüentemente dos emissores, resultando no aumento de vazão ($QR > 1,00$) em alguns momentos durante a operação do sistema.

Tabela 22. Valores médios da vazão relativa (QR, em decimal) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA
	G2	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA
	G3	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA
40	G1	1,08aA	1,00aA	0,99aA	1,08aA	1,01aA
	G2	1,04aA	1,03aA	0,99aA	1,04aA	1,03aA
	G3	1,06aA	1,00aA	1,00aA	1,00aA	1,01aA
80	G1	1,07aA	1,02abA	0,97bA	1,08aA	1,02abA
	G2	1,04abAB	1,06aA	0,92cA	1,03abA	0,95bcA
	G3	0,98aB	0,98aA	0,99aA	1,01aA	0,98aA
120	G1	1,05aA	0,98abA	0,95bA	1,05aA	0,90bA
	G2	1,01abA	1,03aA	0,94abA	0,92bB	0,81cB
	G3	1,01aA	0,96abA	0,92abA	0,92abB	0,91bA
160	G1	1,06abA	1,00abA	0,97bA	1,07aA	0,86cA
	G2	0,97aB	1,01aA	0,91aA	0,92aB	0,69bB
	G3	0,96aB	0,96aA	0,93aA	0,89aB	0,89aA

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Ao comparar as médias da variável QR, seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, observou-se, no tempo de funcionamento de 80 h, que a QR da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T3, diferiu da QR das subunidades submetidas aos tratamentos T1 e T4; enquanto os valores de QR das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2 e T3, diferiram entre si.

No tempo de funcionamento de 120 h, a QR das subunidades com gotejador G1, submetidas aos tratamentos T1 e T4, diferiu da QR das subunidades submetidas aos tratamentos T3 e T5; enquanto os valores de QR das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si, assim como os valores de QR das subunidades com gotejador G3, submetidas aos tratamentos T1 e T5.

No tempo de funcionamento final (160 h), os valores de QR das subunidades com gotejador G1 submetidas aos tratamentos T3, T4 e T5 diferiram entre si; enquanto a QR da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T5, foi diferente da QR dos demais tratamentos.

Comparando as médias da variável QR seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, notou-se que no tratamento T1, no tempo de funcionamento de 80 h, a QR da subunidade com gotejador G1 diferiu da QR da subunidade com gotejador G3; enquanto no tempo de funcionamento de 160 h, a QR da subunidade com gotejador G1 diferiu da QR das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T4, nos tempos de operação de 120 e 160 h, a QR da subunidade com gotejador G1 foi diferente da QR das subunidades com

gotejadores G2 e G3. No tratamento T5, nos tempos de operação de 120 e 160 h, a QR da subunidade com gotejador G2 diferiu da QR das subunidades com gotejadores G1 e G3.

Oliver et al. (2014) obtiveram valores médios de vazão relativa iguais a 0,47, 0,63 e 0,79, nas unidades de irrigação com gotejadores E1 (1,60 L h⁻¹), E2 (2,0 L h⁻¹) e E3 (2,3 L h⁻¹), respectivamente, após 3600 h de operação com água residuária doméstica tratada.

4.1.5.3 Análise das médias do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR)

Na Tabela 23 encontram-se apresentados os valores médios da variável RQR para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento. Da mesma forma que observado para a QR, constatou-se que não houve efeito dos tratamentos sobre o RQR, para cada tipo de gotejador, até o tempo de funcionamento de 40 h.

Tabela 23. Valores médios do coeficiente de redução da vazão relativa (RQR, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA
	G2	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA
	G3	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA	0,00aA
40	G1	-7,95aA	0,04aA	1,14aA	-7,90aA	-1,44aA
	G2	-4,01aA	-3,00aA	1,21aA	-3,68aA	-3,20aA
	G3	-6,41aA	0,05aA	-0,36aA	-0,26aA	-0,63aA
80	G1	-7,20bB	-2,10abA	2,97aA	-7,78bA	-1,83abA
	G2	-4,08bcAB	-5,60cA	8,18aA	-3,16bcA	5,17abA
	G3	1,62aA	1,98aA	0,49aA	-1,46aA	1,47aA
120	G1	-5,11bA	1,57abA	5,35aA	-5,43bB	9,56aB
	G2	-0,72bcA	-2,76cA	5,51bcA	8,22bA	18,88aA
	G3	-1,34bA	3,78abA	7,99abA	7,46abA	9,44aB
160	G1	-6,50bcB	0,41bcA	3,25bA	-6,91cB	13,92aB
	G2	2,57bA	-1,18bA	8,47bA	7,95bA	31,02aA
	G3	3,67aA	4,20aA	7,33aA	10,71aA	10,97aB

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

O RQR expressa o grau de entupimento dos emissores em relação ao tempo de operação. Foram constatadas reduções na vazão dos emissores para valores positivos (RQR > 0,00) e aumentos para valores negativos (RQR < 0,00).

Verificou-se que, ao comparar as médias da variável RQR seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, no tempo de funcionamento de 80 h, o RQR das subunidades com gotejador G1, submetidas ao tratamento T3, diferiu do RQR das subunidades submetidas aos

tratamentos T1 e T4; enquanto o RQR da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T2, foi diferente do RQR da subunidade submetida ao tratamento T3 e T5.

No tempo de funcionamento de 120 h, o RQR das subunidades com gotejador G1, submetidas aos tratamentos T1 e T4, diferiu do RQR das subunidades submetidas aos tratamentos T3 e T5; os valores de RQR das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si; enquanto o RQR da subunidade com gotejador G3, submetida ao tratamento T1, diferiu do RQR da subunidade submetida ao tratamento T5.

No tempo de funcionamento de 160 h, os valores de RQR das subunidades com gotejador G1, submetidas aos tratamentos T3, T4 e T5, diferiram entre si; enquanto que o RQR da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T5 diferiu do RQR dos demais tratamentos.

Ao comparar as médias da variável RQR seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, constatou-se que, no tratamento T1, no tempo de funcionamento de 80 h, o RQR da subunidade com gotejador G1 diferiu do RQR da subunidade com gotejador G3; enquanto no tempo de funcionamento de 160 h, os valores de RQR da subunidade com gotejador G1 diferiram dos valores de RQR das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T4, nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, o RQR da subunidade com gotejador G1 foi diferente do RQR das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T5, nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, o RQR da subunidade com gotejador G2 diferiu do RQR da subunidade com gotejador G1 e G3.

Fischer Filho et al. (2017), ao avaliar seis modelos de emissores não compensadores de pressão operando com efluente de esgoto tratado, concluíram que o modelo E4 (Chapin - 1,24 L h⁻¹) obteve desempenho inferior aos demais, apresentando coeficiente de redução da vazão relativa, ao final do experimento, igual a 0,12.

4.1.5.4 Análise das médias do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD)

Estão apresentados, na Tabela 24, os valores médios da variável CUD para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento. Pode-se observar que houve efeito dos tratamentos sobre o CUD, para cada tipo de gotejador, a partir do tempo de funcionamento de 80 h.

Tabela 24. Valores médios do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	91,20aA	92,69aA	96,05aA	93,83aA	94,94aA
	G2	87,47aA	91,07aA	91,61aA	93,13aA	95,77aA
	G3	93,97aA	94,56aA	95,12aA	91,75aA	92,00aA
40	G1	93,32aA	91,59aA	95,74aA	91,05aA	89,91aA
	G2	87,81aA	92,52aA	92,71aA	92,97aA	88,45aA
	G3	92,80aA	95,89aA	93,17aA	88,51aA	94,87aA
80	G1	93,83aA	91,82aA	94,37aA	92,99aA	93,56aA
	G2	89,14abA	92,89aA	81,79abB	90,39abA	77,76bB
	G3	92,91aA	93,00aA	94,08aA	88,01aA	94,94aA
120	G1	94,35aA	89,10abA	95,29aA	92,96abA	80,41bA
	G2	88,25abA	95,12aA	90,16abA	79,29bB	56,32cB
	G3	96,69aA	96,39aA	91,29aA	87,02aAB	90,46aA
160	G1	95,97aA	90,91aA	95,78aA	94,03aA	74,58bA
	G2	82,73abB	92,22aA	86,72aA	73,16bB	26,34cB
	G3	93,66aAB	94,74aA	91,78aA	81,88aB	82,93aA

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Constatou-se que as maiores reduções nos valores médios do CUD ocorreram para o gotejador G2, quando submetido ao tratamento T5, sendo o menor valor (26,34%) observado no tempo de operação final (160 h). Essa redução pode ser atribuída ao entupimento parcial do gotejador, ocasionado pela formação da incrustação ao longo do tempo, comprometendo a uniformidade de aplicação do efluente.

Ao comparar as médias da variável CUD seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, no tempo de funcionamento de 80 h, constatou-se que o CUD da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T2, diferiu do CUD da subunidade submetida ao tratamento T5.

No tempo de funcionamento de 120 h, o CUD da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, foi diferente do CUD das subunidades T1 e T3; enquanto os valores de CUD das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si.

No tempo de funcionamento final (160 h), o CUD da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiu do CUD das subunidades submetidas aos demais tratamentos; enquanto os valores de CUD das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si.

Estabelecendo comparação entre as médias da variável CUD seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, constatou-se que, no tratamento T1, no tempo de funcionamento de 160 h, o CUD da subunidade com gotejador G1 diferiu do CUD das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T3, no tempo de funcionamento de 80 h, o CUD da

subunidade com gotejador G2 foi diferente do CUD das subunidades com gotejadores G1 e G3. No tratamento T4, no tempos de funcionamento de 120 h, o CUD das subunidades com gotejadores G1 e G2 diferiram entre si; enquanto no tempo de funcionamento de 160 h, o CUD da subunidade com gotejador G1 foi diferente do CUD das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T5, nos tempos de funcionamento 80, 120 e 160 h, os valores de CUD das subunidades com gotejador G2 diferiram do CUD das subunidades com gotejadores G1 e G3.

Batista et al. (2013a), avaliando a suscetibilidade ao entupimento de gotejadores operando com água residuária de suinocultura, constataram que não houve efeito do manejo de água sobre o CUD, para cada tipo de gotejador, até o tempo de funcionamento de 60 h. Em outro estudo, Batista et al. (2013b) notaram reduções nos valores de CUD iguais a 83, 38 e 29%, após 160 h de operação do sistema com água residuária de suinocultura, para os gotejadores G1 (Naan Tif - 2,0 L h⁻¹), G2 (Naan Drip Paz 25 - 1,7 L h⁻¹) e G3 (Plastro Hydro PC - 3,6 L h⁻¹), respectivamente.

4.1.5.5 Análise das médias do coeficiente de variação de vazão (CVQ)

Constam, na Tabela 25, os valores médios da variável CVQ para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento. Observou-se que houve efeito dos tratamentos sobre o CVQ, para cada tipo de gotejador, a partir do tempo de funcionamento de 80 h.

Tabela 25. Valores médios do coeficiente de variação de vazão (CVQ, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	7,22aA	5,97aA	3,45aA	5,01aA	4,24aA
	G2	9,42aA	7,11aA	6,78aA	5,48aA	3,53aA
	G3	4,79aA	4,41aA	4,17aA	6,54aA	6,06aA
40	G1	5,29aA	6,57aA	3,32aA	7,29aA	8,22aA
	G2	9,75aA	6,31aA	6,27aA	5,83aA	9,78aA
	G3	5,21aA	3,41aA	5,21aA	8,60aA	4,32aA
80	G1	5,31aA	6,08aA	4,36aB	5,72aA	5,24aB
	G2	7,87bA	5,75bA	15,81abA	7,77bA	19,22aA
	G3	6,42aA	6,18aA	4,86aB	8,81aA	4,16aB
120	G1	4,87bA	8,07abA	3,94bA	6,89bB	18,06aB
	G2	9,56bcA	4,49cA	8,07bcA	17,52bA	31,61aA
	G3	2,58aA	3,06aA	6,40aA	10,45aAB	8,26aC
160	G1	3,53bB	6,67bA	3,34bB	4,89bB	23,41aB
	G2	15,03bcA	5,90cA	12,90bcA	21,88bA	48,99aA
	G3	5,93aAB	4,27aA	6,37aAB	13,64aAB	13,54aC

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Houveram oscilações nos valores de CVQ dos gotejadores ao longo do tempo, em todos os tratamentos, sendo o maior valor médio (48,99%) observado para o gotejador G2, submetido ao tratamento T5, no tempo de funcionamento final (160 h). Isso está atrelado ao fato de que ocorreram maiores obstruções para esse tipo de gotejador, alterando a vazão ao longo da linha lateral e resultando numa maior variação.

Estabelecendo comparação entre as médias da variável CVQ seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, no tempo de funcionamento de 80 h, observou-se que o CVQ da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T5, diferiu do CVQ das subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2 e T4.

No tempo de funcionamento de 120 h, o CVQ da subunidade com gotejador G1, submetido ao tratamento T5, diferiu do CVQ das subunidades submetidas aos gotejadores T1, T3 e T4; enquanto os valores de CVQ das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si.

No tempo de funcionamento final (160 h), os valores de CVQ da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiram das subunidades submetidas aos demais tratamentos; enquanto os valores de CVQ das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5 diferiram entre si.

Comparando as médias da variável CVQ seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, notou-se que, no tratamento T1, no tempo de funcionamento de 160 h, o CVQ da subunidade com gotejador G2 diferiu do CVQ das subunidades com gotejadores G1 e G3. No tratamento T3, nos tempos de funcionamento de 80 e 160 h, o CVQ da subunidade com gotejador G2 diferiu do CVQ das subunidades com gotejadores G1 e G3. No tratamento T4, nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, os valores de CVQ das subunidades com gotejadores G1 e G2 diferiram entre si. No tratamento T5, no tempo de funcionamento de 80 h, o CVQ da subunidade com gotejador G2 foi diferente do CVQ das subunidades com gotejadores G1 e G3; enquanto nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, os valores de CVQ das subunidades com gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si.

Ao avaliar o desempenho de unidades gotejadoras operando com percolado de aterro sanitário diluído, Mesquita et al. (2016a) constatou aumentos significativos dos valores médios do CVQ apenas para o gotejador G1 (Plastro Hydrodrip Super – $1,65 \text{ L h}^{-1}$), a partir de 40 h de operação do sistema, obtendo valor de 26,89% no tempo de operação final (160 h).

Esses resultados estão abaixo dos encontrados por Liu & Huang (2009), em que as unidades com gotejadores E1 ($2,83 \text{ L h}^{-1}$) e E2 ($1,88 \text{ L h}^{-1}$) apresentaram aumento nos valores de CVQ de 62 e 135%, respectivamente, após 1680 horas de operação com águas residuárias domésticas tratadas.

4.1.5.6 Análise das médias do coeficiente de uniformidade estatística (Us)

Os valores médios da variável Us, para o fator gotejador dentro de cada nível de tratamento e cada nível de tempo de funcionamento, estão apresentados na Tabela 26. Observou-se que houve efeito dos tratamentos sobre o Us, para cada tipo de gotejador, a partir do tempo de funcionamento de 80 h.

Pode-se constatar que os valores médios do Us dos gotejadores pouco variaram ao longo do tempo, em todos os tratamentos, com exceção do gotejador G2 submetido ao tratamento T5, em que os valores decresceram de 96,47% (0 h) para 51,01% (160 h), indicando menor resistência desse tipo de emissor ao entupimento quando comparado aos gotejadores G1 e G3.

Analisando as médias da variável Us seguidas de pelo menos uma letra minúscula nas linhas, no tempo de funcionamento de 80 h, observou-se que o Us da subunidade com gotejador G2, submetida ao tratamento T5, diferiu do Us das subunidades submetidas aos tratamentos T1, T2 e T4.

Tabela 26. Valores médios do coeficiente de uniformidade estatística (Us, em %) para o fator gotejador dentro de cada nível de tempo de funcionamento e cada nível de tratamento

Tempo de funcionamento (h)	Gotejador	Tratamentos*				
		T1	T2	T3	T4	T5
0	G1	92,77aA	94,03aA	96,55aA	94,98aA	95,76aA
	G2	90,58aA	92,89aA	93,22aA	94,52aA	96,47aA
	G3	95,21aA	95,59aA	95,83aA	93,46aA	93,94aA
40	G1	94,71aA	93,43aA	96,68aA	92,71aA	91,78aA
	G2	90,25aA	93,69aA	93,72aA	94,17aA	90,22aA
	G3	94,79aA	96,59aA	94,79aA	91,39aA	95,68aA
80	G1	94,68aA	93,92aA	95,64aA	94,28aA	94,76aA
	G2	92,13aA	94,25aA	84,19abB	92,23aA	80,78bB
	G3	93,58aA	93,82aA	95,14aA	91,19aA	95,84aA
120	G1	95,13aA	91,93abA	96,06aA	93,11aA	81,94bB
	G2	90,44abA	95,51aA	91,93abA	82,48bB	68,39cC
	G3	97,42aA	96,94aA	93,60aA	89,55aAB	91,74aA
160	G1	96,46aA	93,33aA	96,65aA	95,11aA	76,59bB
	G2	84,97abB	94,10aA	87,09abB	78,12bB	51,01cC
	G3	94,07aAB	95,73aA	93,63aAB	86,36aAB	86,46aA

Nota: * Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas linhas para cada tratamento e maiúscula nas colunas para cada tempo de funcionamento não diferem entre si, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

No tempo de funcionamento de 120 h, o Us da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiu do Us das subunidades submetidas aos tratamentos T1, T3 e T4; enquanto os valores do Us das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5, diferiram entre si.

No tempo de funcionamento de 160 h, o Us da subunidade com gotejador G1, submetida ao tratamento T5, diferiu do Us das subunidades submetidas aos demais tratamentos; enquanto o Us das subunidades com gotejador G2, submetidas aos tratamentos T2, T4 e T5 diferiram entre si.

Ao comparar as médias da variável Us seguidas de pelo menos uma letra maiúscula nas colunas, notou-se que, no tratamento T1, no tempo de funcionamento de 160 h, o Us da subunidade com gotejador G1 diferiu do Us das subunidades com gotejadores G2 e G3. No tratamento T3, no tempo de funcionamento de 80 h, o Us da subunidade com gotejador G2 foi diferente do Us das subunidades com gotejadores G1 e G3; enquanto no tempo de funcionamento de 160 h, os valores de Us das subunidades com gotejadores G1 e G2 diferiram entre si. No tratamento T4, nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, os valores de Us das subunidades com gotejadores G1 e G2 diferiram entre si. No tratamento T5, no tempo de funcionamento de 80 h, o Us da subunidade com gotejador G2 diferiu do Us das subunidades com gotejadores G1 e G3; enquanto nos tempos de funcionamento de 120 e 160 h, os valores de Us das subunidades com gotejadores G1, G2 e G3 diferiram entre si.

Mesquita et al. (2016a) constatou redução significativa dos valores médios do coeficiente de uniformidade estatística apenas para o gotejador G1 (Plastro Hydrodrip Super – 1,65 L h⁻¹), a partir de 40 h de operação do sistema com percolado de aterro sanitário diluído, obtendo valor de 73,11% no tempo de operação final (160 h).

4.1.6 Análise visual e por microscopia óptica da incrustação formada nos gotejadores

Decorridas as 160 h de operação do sistema, realizou-se a abertura dos gotejadores G1, G2 e G3 para avaliação visual dos agentes ocasionadores de obstrução, como apresentado na Figura 19.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

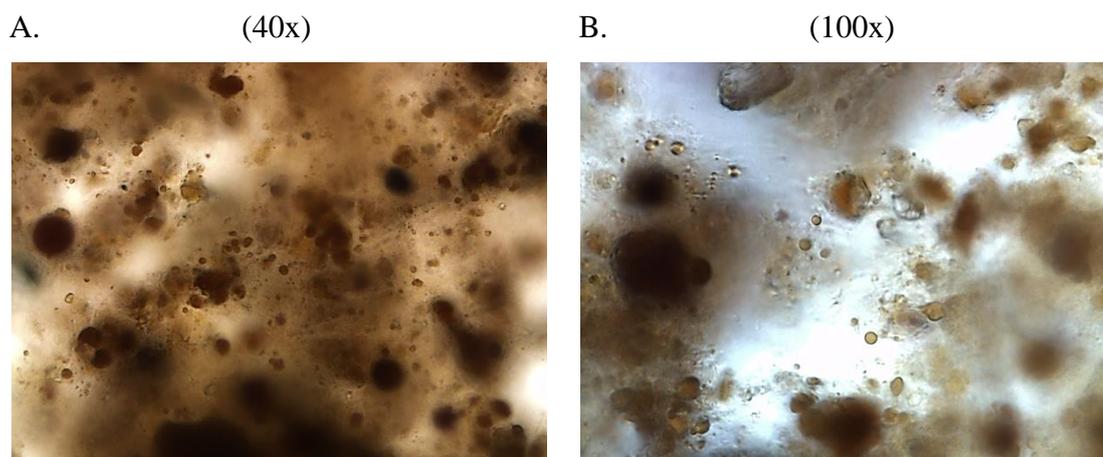
Figura 19. Imagem do desenvolvimento da incrustação no interior dos gotejadores G1 (A), G2 (B) e G3 (C) que aplicaram água produzida tratada diluída

Segundo Oliver et al. (2014), o biofilme é um composto de secreções microbianas e partículas em suspensão presentes nas águas residuárias. Observou-se que ocorreu a formação de biofilme de coloração escura no labirinto e na área de filtragem dos gotejadores G1, G2 e

G3 (Figuras 19A, 19B e 19C, respectivamente), o que provocou alteração na vazão dos gotejadores e, conseqüentemente, em todos os indicadores de desempenho hidráulico.

Em condições experimentais diferentes, Silva et al. (2013) observaram nos gotejadores entupidos o desenvolvimento de biofilme complexo, acumulado principalmente nos labirintos dos gotejadores; enquanto Mesquita et al. (2016b) encontraram a formação de um biofilme marrom escuro dentro dos gotejadores aplicando lixiviado diluído de aterro sanitário, com maior adesão do biofilme na área de filtragem do gotejador não autocompensante.

Não foi possível identificar a presença de agentes biológicos através da análise por microscopia óptica na matriz da incrustação, devido, provavelmente, a composição química da água produzida tratada que não favorece o desenvolvimento de microrganismos, sendo visualizadas, apenas, gotículas de óleo emulsionado (Figura 20). Dessa forma, pode-se deduzir que o entupimento parcial dos gotejadores testados teve como principal causa a formação de uma incrustação resultante da interação dos agentes físico-químicos presentes nas diluições da água produzida tratada, afetando o desempenho hidráulico do sistema.



Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 20. Análise por microscopia óptica da incrustação formada no interior dos gotejadores G1, G2 e G3, observado através das lentes objetivas de 40x (A) e 100x (B) de aumento

As obstruções causadas por fatores físico-químicos geralmente resultam de partículas inorgânicas em suspensão e orgânicas e, da precipitação de sais de cálcio, magnésio, ferro ou manganês, formando incrustações que podem bloquear, parcial ou completamente a passagem da água (Cunha et al., 2017).

Este resultado difere dos encontrados por Batista et al. (2013a), em que relataram uma formação complexa de biofilme, resultante da interação entre bactérias e sólidos totais no emissor operando com água residuária da suinocultura; por Duran-Ros et al. (2009) que observaram incrustação composta por cálcio, silicato de alumínio, manganês, areia e algas em

emissores aplicando água residuária doméstica tratada; e por Batista et al. (2010) que relataram uma formação de biofilme resultante da interação entre bactérias e algas em uma unidade de irrigação por gotejamento operando com águas residuárias domésticas terciárias.

4.2 Experimento II

4.2.1 Curvas relacionando vazão em função da pressão de serviço para distintos gotejadores operando com diluições de água produzida tratada

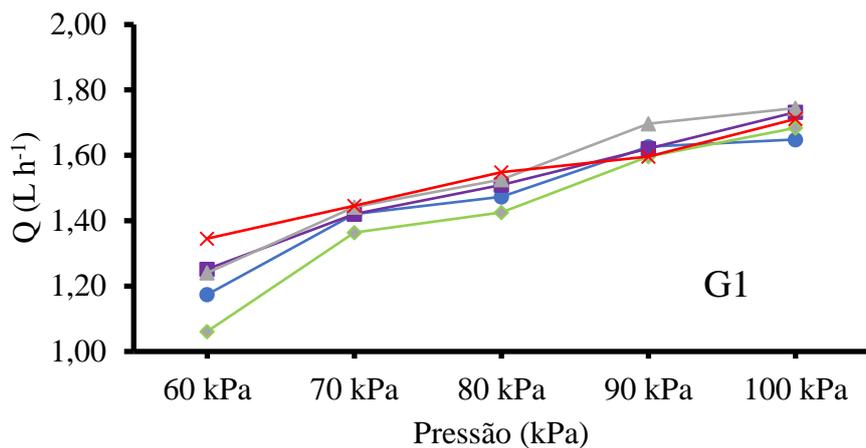
Na Figura 21 estão apresentadas as curvas relacionando vazão e pressão de serviço dos gotejadores G1, G2 e G3 operando com as diluições T1 (100% AS), T2 (90% AS e 10% AP), T3 (80% AS e 20% AP), T4 (70% AS e 30% AP) e T5 (60% AS e 40% AP).

Observa-se que para todos os gotejadores ocorreu aumento de vazão ao se elevar a pressão de serviço, independente do tratamento utilizado. Conforme evidenciado por Liu et al. (2019), à medida que a pressão de serviço aumenta, a vazão média dos emissores também aumenta, o que eleva ainda mais a força de cisalhamento hidráulico.

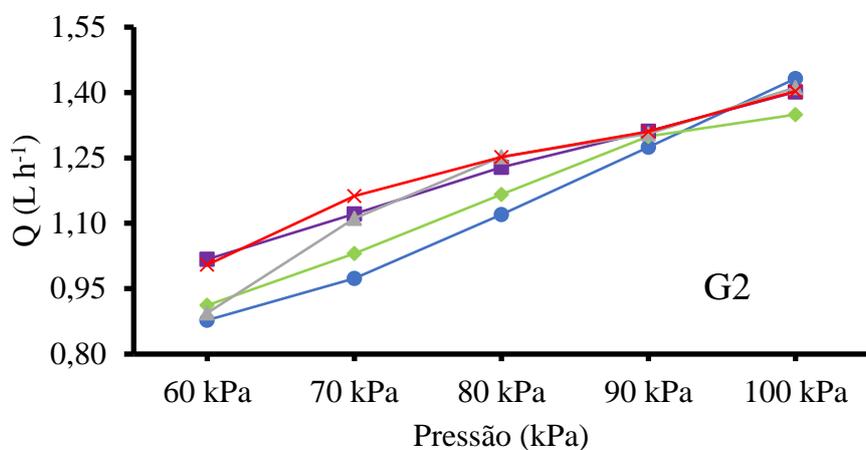
Esse resultado é semelhante aos obtidos por Silva et al. (2017) em seu trabalho sobre a obstrução e uniformidade em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando águas residuárias tratadas, e por Bodole et al. (2016) ao avaliar o desempenho de gotejadores em escala laboratorial.

Tanto as diferentes proporções de água produzida tratada, quanto as variações na pressão de serviço interferiram na vazão dos gotejadores ensaiados. De modo geral, os maiores valores de vazão foram observados para os gotejadores submetidos ao tratamento T5. Esse comportamento já era esperado, visto que esse tratamento foi composto por uma maior proporção de água produzida tratada, apresentando, conseqüentemente, maior oleosidade. Dessa forma, o óleo presente na diluição ocasionou, provavelmente, redução da viscosidade do fluido, aumentando as forças de cisalhamento e a taxa de fluxo dentro do emissor.

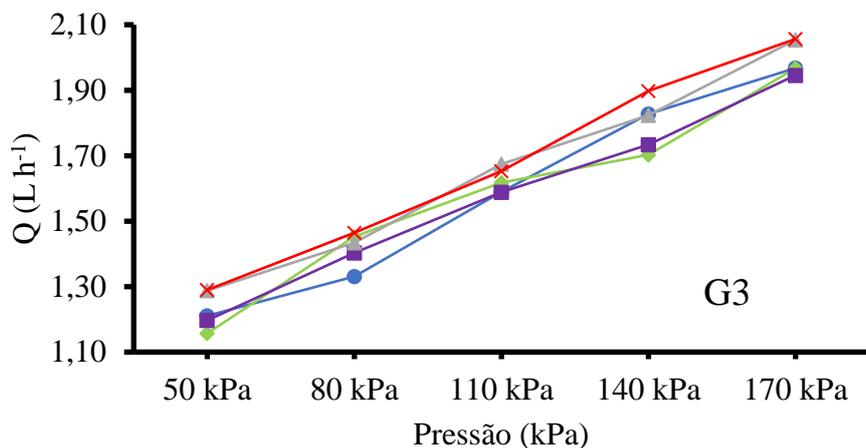
A.



B.



C.



—●— T1 —◆— T2 —■— T3 —▲— T4 —×— T5

Nota: T1 - 100% de água subterrânea (AS), T2 - 90% de AS e 10% de água produzida tratada (AP), T3 - 80% de AS e 20% de AP, T4 - 70% de AS e 30% de AP e T5 - 60% de AS e 40% de AP.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Figura 21. Curvas relacionando vazão (Q) e pressão de serviço dos gotejadores G1 (A), G2 (B) e G3 (C) operando com diluições de água produzida tratada

Apesar dos gotejadores G1 e G2 apresentarem vazões nominais iguais (1,6 L h⁻¹) e operarem sob a mesma faixa de pressão (60 – 100 kPa), notou-se que houve comportamentos distintos. Ao operar sob as pressões de serviço de 90 e 100 kPa, o gotejador G1 apresentou vazões iguais e/ou superiores à vazão nominal em todos os tratamentos. Já o gotejador G2, mesmo operando sob a máxima pressão recomendada (100 kPa), não atingiu a vazão nominal informada pelo fabricante, o que pode comprometer o desempenho do sistema. Esse fato pode ser atribuído às diferenças na arquitetura interna dos gotejadores. Segundo Ribeiro et al. (2012) a arquitetura interna dos gotejadores é fator determinante na caracterização do processo de entupimento.

Durante o experimento II é improvável que os gotejadores tenham sofrido algum efeito do entupimento, visto que o tempo de funcionamento do sistema não foi suficiente para que ocorresse a sedimentação de partículas e o desenvolvimento de incrustações.

Na Tabela 27 estão apresentadas as equações de regressão ajustadas para as curvas relacionando vazão (Q) e pressão de serviço (P) dos gotejadores G1, G2 e G3 operando com diluições de água produzida tratada.

Verificou-se que o fluxo dos três modelos de gotejadores pode ser perfeitamente caracterizado pelas funções potenciais que apresentaram alto coeficiente de determinação (R²).

Tabela 27. Equações de regressão ajustadas à variável vazão (Q) em função da pressão de operação (P) dos gotejadores (G1, G2 e G3) operando com diferentes tipos de tratamentos (T1, T2, T3, T4 e T5) e os respectivos coeficientes de determinação (R²)

Gotejador	Tratamento	Equação de regressão	R ²
G1	T1	$\hat{Q} = 0,08501P^{0,6509**}$	0,92
	T2	$\hat{Q} = 0,03281P^{0,8611**}$	0,94
	T3	$\hat{Q} = 0,10189P^{0,6156**}$	0,99
	T4	$\hat{Q} = 0,08163P^{0,6696**}$	0,97
	T5	$\hat{Q} = 0,20882P^{0,4553**}$	0,99
G2	T1	$\hat{Q} = 0,01591P^{0,9739**}$	0,99
	T2	$\hat{Q} = 0,03438P^{0,8019**}$	0,99
	T3	$\hat{Q} = 0,07838P^{0,6265**}$	1,00
	T4	$\hat{Q} = 0,02799P^{0,8570**}$	0,95
	T5	$\hat{Q} = 0,07960P^{0,6249**}$	0,97
G3	T1	$\hat{Q} = 0,22747P^{0,4171**}$	0,96
	T2	$\hat{Q} = 0,23915P^{0,4058**}$	0,98
	T3	$\hat{Q} = 0,25924P^{0,3878**}$	0,99
	T4	$\hat{Q} = 0,28261P^{0,3800**}$	0,97
	T5	$\hat{Q} = 0,27638P^{0,3871**}$	0,98

Nota: ** significativos a 1% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Acervo do pesquisador (2019).

Os valores do expoente da vazão (x) obtidos para os gotejadores G1, G2 e G3 variaram de 0,3800 a 0,9739. Dessa forma, os três tipos de gotejadores apresentaram valores de “x” maiores que 0,2, indicando que estes emissores são não autocompensantes (ABNT, 2006), conforme

manifestam seus fabricantes, e menores que 1, o que indica a predominância do regime de escoamento turbulento (Pizarro Cabello, 1990).

Resultado semelhante foi observado por Fernandes et al. (2014) em estudo com água residuária do caju, onde as equações de regressão ajustadas para as curvas relacionando vazão e pressão de serviço dos gotejadores G1 (Plastro Hydrodrip Super - $1,65 \text{ L h}^{-1}$), G2 (Netafim PCJ-CNJ - $2,00 \text{ L h}^{-1}$) e G3 (Netafim PCJ-CNJ - $4,00 \text{ L h}^{-1}$) também apresentaram valores do expoente de vazão (x) menores que 1.

Observou-se, ainda, que o gotejador G3 apresentou menor variação de vazão com a pressão de serviço, quando comparado ao G1 e G2, independente do tratamento aplicado, visto que quanto mais próximo de zero o valor do expoente de vazão (x), menor a variação. Além disso, o gotejador G3 apresentou coeficiente “k” mais próximo ao da especificação do fabricante (Tabela 8), indicando que esse tipo de emissor apresentou o comportamento esperado.

Silva et al. (2017), avaliando a obstrução e uniformidade de aplicação de águas residuárias tratadas em sistemas de irrigação por gotejamento, obtiveram uma curva característica para cada tratamento WET (efluente de sistema alagado construído), UASB + WET (efluente de reator anaeróbio de fluxo ascendente seguido de sistema alagado construído) e ABAST (água de abastecimento), com valores de expoente “x” muito próximos de zero, sendo estes iguais a 0,097, 0,086 e 0,097, respectivamente.

5 CONCLUSÕES

Dentre as características físico-químicas das diluições de água produzida tratada, apenas o pH representou risco severo de entupimento de gotejadores, enquanto os atributos CE, Ca^{2+} , Mg^{2+} , SS e SD representaram risco de entupimento classificado como baixo.

Os modelos de regressão linear, quadrático e raiz quadrada foram os que melhor se ajustaram à relação entre as variáveis de desempenho hidráulico Q, QR, RQR, CUD, CVQ e Us, em função do tempo de operação das unidades de irrigação.

Os modelos de regressão linear e quadrático ajustaram-se melhor à variável vazão (Q), em função da posição dos gotejadores ao longo das linhas laterais.

O entupimento parcial dos gotejadores testados teve como principal causa a formação de uma incrustação de coloração escura, resultante da interação dos agentes físico-químicos presentes nas diluições da água produzida tratada.

A maior suscetibilidade ao entupimento foi verificada para o gotejador G2, quando submetido ao tratamento T5 (60% AS e 40% AP), devido, provavelmente, a sua menor área de filtração e a formação de incrustação sobre ela.

O gotejador G2, mesmo operando sob a máxima pressão recomendada (100 kPa), não atingiu a vazão nominal informada pelo fabricante, o que pode comprometer o desempenho do sistema.

Para os três modelos de gotejadores ocorreu aumento de vazão ao se elevar a pressão de serviço, independente do tratamento utilizado.

O gotejador G3, quando submetido aos tratamentos T1 (100% AS) ao T3 (80% AS e 20% AP), é o mais recomendado na operação com água produzida tratada diluída.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261. São Paulo: ABNT, 2006. 17p.
- Abousnina, R. M.; Nghiem, L. D.; Bundschuh, J. Comparison between oily and coal seam gas produced water with respect to quantity, characteristics and treatment technologies: a review. *Desalination and Water Treatment*, v.54, p.1793-1808, 2015.
- Ahmed, B. A. O.; Yamamoto, T.; Fujiyama, H.; Miyamoto, K. Assessment of emitter discharge in microirrigation system as affected by polluted water. *Irrigation and Drainage*, v.21, p.97-107, 2007.
- Al-Amoud, A. I.; Mattar, M. A.; Ateia, M. Impact of water temperature and structural parameters on the hydraulic labyrinth-channel emitter performance. *Spanish Journal Agricultural Research*, v.12, p.580-593, 2014.
- Albuquerque, A. C.; Andrade, C.; Neves, B. Biocorrosão – da integridade do biofilme à integridade do material. *Corrosão e Protecção de Materiais*, v.33, p.18-23, 2014.
- Al-Haleem, A. A.; Abdulah, H. H.; Saeed, E. Abdul-Jalil. Components and Treatments of Oilfield Produced Water. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, v.6, p.24-30, 2010.
- Almeida, O. A. Qualidade da água de irrigação. Cruz das Almas: EMBRAPA, 2010. 234 p.
- Álvares, C. A.; Stape, J. L.; Sentelhas, P. C.; Moraes Gonçalves, J. L.; Sparovek, G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v.22, p.711-728, 2013.
- American Society for Agricultural Engineering - ASAE EP405.1 APR1988 (R2008). Design and installation of microirrigation systems. ASABE, St. Joseph, MI, 2008, 5p.
- Amini, S.; Mowla, D.; Golkar, M.; Esmailzadeh, F. Mathematical modelling of a hydrocyclone for the down-hole oil-water separation (DOWS). *Chemical Engineering Research and Design*, v.90, p.2186-2195, 2012.
- ANA. Agência Nacional das Águas (Brasil). Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2017: relatório pleno / Agência Nacional das Águas – Brasília: ANA, 2017. 169p.
- Angelim, L. A. A., Medeiros, V. C., Nesi, J. R. Mapa geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Programa Geologia do Brasil – PGB. Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Recife: CPRM/FAPERN, 2006. 1mapa color., 130 cm x 91 cm. Escala. 1:500.000. Disponível em: <http://geobank.cprm.gov.br/pls/publico/geobank.documents.download?id_sessao=20150818130340&usuario=1&file=riograndedonorte_lito.zip>. Acesso em: 11 de dez. 2018.
- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis 2018. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br>>. Rio de Janeiro: ANP, 2018.

- ANP. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Oportunidades no setor de petróleo e gás natural no Brasil (rodadas de licitações 2017-2019). Disponível em <<http://www.anp.gov.br>>. Rio de Janeiro: ANP, 2017.
- Ayers, R. S.; Westcot, D. W. A qualidade da água na agricultura. 2.ed. Campina Grande: UFPB, 1999. 218p. (Estudos da FAO: Irrigação e Drenagem, 29 Revisado).
- Bakke, T.; Klungsoyr, J.; Sanni, S. Environmental impacts of produced water and drilling waste discharges from the Norwegian offshore petroleum industry. *Marine Environmental Research*, v.92, p.154-169, 2013.
- Batista, R. O.; Costa, F. G. B.; Lopes, H. S. S.; Coelho, D. C. L.; Costa Paiva, M. R. F. Efeito das características do esgoto doméstico na uniformidade de aplicação de sistemas de irrigação por gotejamento. *Revista Caatinga*, v.24, p.137-144, 2011a.
- Batista, R. O.; Matos, A. T.; Cunha, F. F.; Lo Monaco, P. A. Formação de biofilme em gotejadores aplicando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.29, p.367-371, 2007.
- Batista, R. O.; Oliveira, A. F. M.; Mesquita, F. O. Desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária da suinocultura. *Magistra*, v.26, p.75-88, 2014a.
- Batista, R. O.; Oliveira, R. A.; Figueiredo, V. B.; Silva, K. B.; Ferreira, D. A. C. Vazão de gotejadores com distintos tempos de irrigação aplicando água residuária de suinocultura e água de abastecimento. *Engenharia Agrícola*, v.34, p.1283-1295, 2014c.
- Batista, R. O.; Oliveira, R. A.; Mesquita, F. O. Desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária da suinocultura. *Revista Verde*, v.7, p.26-32, 2012.
- Batista, R. O.; Oliveira, R. A.; Santos, D. B.; Cunha, F. F.; Medeiros, S. S. Modelos empíricos da aplicação de água residuária de suinocultura por gotejadores sob pressões de serviço. *Irriga*, v.21, p.648-661, 2016.
- Batista, R. O.; Oliveira, R. A.; Santos, D. B.; Mesquita, F. O.; Silva, K. B. Suscetibilidade ao entupimento de gotejadores operando com água residuária de suinocultura. *Water Resources and Irrigation Management*, v. 2, n. 1, p. 19-25, 2013a.
- Batista, R. O.; Oliveira, R. A.; Santos, D. B.; Oliveira, A. F. M.; Azevedo, C. A. V.; Medeiros, S. S. Obstrução e uniformidade de aplicação em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando-se efluente da suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.17, p.698-705, 2013b.
- Batista, R. O.; Silva Júnior, M. J.; Santos, D. B.; Cunha, F. F.; Mesquita, F. O.; Freire, F. G. C. Gotejadores aplicando proporções de tempo de irrigação com efluente da suinocultura e água de abastecimento. *Bioscience Journal*, v.30, p.1746-1756, 2014b.
- Batista, R. O.; Soares, A. A.; Moreira, D. A.; Feitosa, A. P.; Bezerra, J. M. Influência de diferentes qualidades de esgoto doméstico na vazão de gotejadores. *Revista Caatinga*, v.24, p.128-134, 2011b.

- Batista, R. O.; Soares, A. A.; Souza, J. A. R.; Batista, R. O. Modelos empíricos da irrigação localizada com esgoto sanitário tratado. *Engenharia na Agricultura*, v. 16, p.369-377, 2008.
- Batista, R. O.; Souza, J. A. R.; Ferreira, D. C. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. *Revista Ceres*, v. 57, p. 18-22, 2010.
- Batista, R.O.; Ferreira, D. J. L.; Santos, D. B.; Lemos Filho, L. C. A; Rocha, T. A. L. C. G.; Medeiros, I. E. S. Vazão de gotejadores ao longo de linhas laterais operando com água residuária da suinocultura sob pressões de serviço. *Revista Espacios*, v.38, p.7-17, 2017.
- Bernardo, S.; Soares, A. A.; Mantovani, E. C. Manual de irrigação. 7 ed. Viçosa: Editora UFV, 2005. 611p.
- Bodole, C.; Koech, R.; Pezzaniti, D. Laboratory evaluation of dripper performance. *Flow Measurement and Instrumentation*, v.50, p.261-268, 2016.
- BP, 2017. British Petroleum (BP) Energy Outlook 2017 Edition: Data Tables [WWW Document]. URL. (Acessado em: 27 Ago. de 2018) <http://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/energy-outlook/energy-outlook-downloads.html>
- Bralts, V. F.; Edward, D. M.; Wu, I. P. Drip irrigation design and evaluation based on statistical uniformity concept. In: Hillel, D. (Ed). *Advances in irrigation*. Orlando: Academic Press, 1987. v.4, p.67-117.
- Burkhardt, A.; Gawde, A.; Cantrell, C. L.; Baxter, H. L.; Joyce, B. L.; Stewart Jr., C. N.; Zheljzkov, V. D. Effects of Produced Water on Soil Characteristics, Plant Biomass, and Secondary Metabolites. *Journal of Environmental Quality*, v.44, p.1938-1947, 2015a.
- Busato, C. C. M.; Soares, A. A.; Ramos, M. M.; Reis, E. F.; Busato, C. Dicloroisocianurato na prevenção do entupimento devido ao uso de águas ferruginosas em sistemas de irrigação por gotejamento. *Semina: Ciências Agrárias*, v.33, p.49-56, 2012.
- Capra, A.; Scicolone, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. *Journal of Cleaner Production*, v.15, p.1529-1534, 2007.
- Capra, A.; Scicolone, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickleirrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.70, p.355-365, 1998.
- Cararo, D. C.; Botrel, T. A.; Hills, D. J.; Leverenz, H. L. Analysis of clogging in drip emitters during wastewater irrigation. *Applied Engineering in Agriculture*, v.22, p.251-257, 2006.
- Carvalho, L. C. C.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Cunha, F. N.; Silva, N. F.; Soares, F. A. L.; Vidal, V. M.; Morais, W. A. Entupimento de emissores autocompensantes com aplicação de sulfato e óxido de ferro. *Científica*, v.44, p.385-402, 2016.
- Carvalho, L. C. C.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B.; Soares, F. A. L.; Silva, N. F. Tubos gotejadores convencionais submetidos a aplicação de óxido de ferro via água com carga orgânica e sólidos suspensos. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada* v.9, p.32-41, 2015.
- Ceará. Resolução COEMA Nº 2 de 2 de fevereiro de 2017. Dispõe sobre padrões e condições para lançamento de efluentes líquidos gerados por fontes poluidoras, revoga as Portarias

SEMACE nº 154, de 22 de julho de 2002 e nº 111, de 05 de abril de 2011, e altera a Portaria SEMACE nº 151, de 21 de fevereiro de 2017. Diário Oficial do Estado do Ceará, Fortaleza, 2017.

- Costa, D. C. L. Aplicação de percolado de aterro sanitário no cultivo de girassol no semiárido brasileiro. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, 2016. 160p. Tese Doutorado
- Costa, F. G. B. Produção e capacidade de fitoextração do girassol (*Heliantus annuus*) irrigado com água produzida. Mossoró: Universidade Federal Rural do Semi-Árido, UFERSA, 2018. 93p. Tese Doutorado
- Costa, F. G. B.; Batista, R. O.; Ferreira, D. J. L.; Silva, S. L.; Pereira, J. O.; Cunha, J. L. O. Desempenho de sistema de irrigação por gotejamento operando com diluições de água residuária doméstica tratada. *Revista Espacios*, v.38, p.10, 2017.
- Cunha, F. F.; Matos, A. T.; Batista, R. O.; Lo Monaco, P. A. Uniformidade de distribuição em sistemas de irrigação por gotejamento utilizando água residuária da despolpa dos frutos do cafeeiro. *Acta Scientiarum. Agronomy*, v.28, p.143-147, 2006.
- Cunha, M. E.; Marques, B. C. D.; Batista, R. O.; Costa, A. G.; Cunha, R. R.; Andrade, A. T. S. Obstrução de gotejadores operando com efluente de laticínio diluído. *Revista Brasileira de Agricultura Irrigada*, v.11, p.1517-1527, 2017.
- Dalri, A. B.; Santos, G. O.; Dantas, G. F.; Faria, R. T.; Zanini, J. R.; Palaretti, L. F. Performance of drippers in two filtering systems using sewage treatment effluent. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.21, p.363-368, 2017.
- Dazhuang, Y.; Zhihui, B.; Rowan, M.; Likun, G.; Shumei, R.; Peiling, Y. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, v.21, p.834-841, 2009.
- Demir, V.; Yurdem, H.; Degirmencioglu, A. Development of prediction models for friction losses in drip irrigation laterals equipped with integrated in-line and on-line emitters using dimensional analysis. *Biosystems Engineering*, v.96, p.617-631, 2007.
- Duran-Ros, M.; Puig-Bargues, J.; Arbat, G.; Barragan, J.; Ramirez de Cartagena, F. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management*, v.96, p.67-79, 2009.
- Elbana, M.; Ramirez de Cartagena, F.; Puig-Bargues, J. Effectiveness of sand media filters for removing turbidity and recovering dissolved oxygen from a reclaimed effluent used for micro-irrigation. *Agricultural Water Management*, v.111, p.27-33, 2012.
- Eroglu, S.; Sahin, U.; Tunc, T.; Sahin, F. Bacterial application increased the flow rate of CaCO₃-clogged emitters of drip irrigation system. *Journal of Environmental Management*, v.98, p.37-42, 2012.
- Fakhru'l-Razi, A.; Pendashteh, A.; Abdullah, L. C.; Biak, D. R. A.; Madaeni, S. S.; Abidin, Z. Z. Review of technologies for oil and gas produced water treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v.170, p.530-551, 2009.

- Faria, L. F.; Coelho, R. D.; Flecha, P. A. N.; Robles, W. G. R.; Vásquez, M. A. N. Entupimento de gotejadores e seu efeito na pressão da rede hidráulica de um sistema de microirrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.6, p.195-198, 2002.
- Fernandes, R. K. A.; Batista, R. O.; Silva, S. K. C.; Oliveira, J. F.; Paiva, L. A. L. Vazão de gotejadores aplicando água residuária da castanha de caju. *Irriga*, v.19, p.585-597, 2014.
- Ferreira, R. N. C.; Weber, O. B.; Crisóstomo, L. A. Produced water irrigation changes the soil mesofauna community in a semiarid agroecosystem. *Environmental Monitoring Assessment*, v.187, p.1-9, 2015.
- Fischer Filho, J. A.; Dalri, A. B.; Santos, M. G.; Zanini, J. R.; Faria, R. T. Non-pressure compensating emitters using treated sewage effluent for irrigation. *Ciência Rural*, v.47, e20151605, 2017.
- Flemming, H. C.; Wingender, J. The biofilm matrix. *Nature Reviews*, v.8, p.623-633, 2010.
- Gamri, S.; Soric, A.; Tomas, S.; Molle, B; Roche, N. Biofilm development in micro-irrigation emitters for wastewater reuse. *Irrigation Science* v.32, p.77-85, 2014.
- Gomes, A. P. P. Gestão ambiental da água produzida na indústria de petróleo: melhores práticas e experiências internacionais. Rio de Janeiro: UFRJ, 2014. 120p. Dissertação Mestrado
- Gomes, A. W. A. Perda localizada de carga em gotejadores integrados em tubos de polietileno. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, ESALQ/USP, 2009, 61p. Dissertação Mestrado
- Google. Google SketchUp, versão 18.0. Disponível em: <http://www.sketchup.com/pt-BR>
Acesso em: Jun. 2018.
- Haghshenas, A.; Nasr-El-Din, H. A. Effect of dissolved solids on reuse of produced water at high temperature in hydraulic fracturing jobs. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, v.21, p.316-325, 2014.
- Hespanhol, I. Viabilidade de um AVAD(*) não superior a 10^{-4} por pessoa por ano, para reuso agrícola de água, em países em desenvolvimento. *Ambi-Água*, v.4, p.124-134, 2009.
- Hillel, D. Solute movement and soil salinity. In: Hillel, D. *Introduction to Environmental Soil Physics*. Elsevier Academic Press: San Diego, 2004. Cap.9, p.167-186, 2004.
- Ibekwe, A. M.; Poss, J. A.; Grattan, S. R.; Grieve, C. M.; Suarez, D. Bacterial diversity in cucumber (*Cucumis sativus*) rhizosphere in response to salinity, soil pH, and boron. *Soil Biology and Biochemistry*, v.42, p.567-575, 2010.
- Ibrahim, Y.; Marroff, A.; Wafi, M. Effect of irrigation with gas produced water enriched with CO₂ on alfalfa growth, quality and mineral content. *Journal of Science and Technology*, v.10, p.36-46, 2009.
- Igunnu, E. T.; Chen, G. Z. Produced water treatment technologies. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, v.9, p.157-177, 2014.
- Keller, J.; Karmeli, D. *Trickle irrigation desing*. Glendora: Rain Bird Sprinkler Manufacturing, 1975. 133 p.

- Kim, J.; Pitts, B.; Stewart, P. S.; Camper, A.; Yoon, J. Comparison of the antimicrobial effects of chlorine, silver ion, and tobramycin on biofilm. *Antimicrobial Agents and Chemotherapy*, v.52, p.1446-1453, 2008.
- Köck-Schulmeyer, M.; Ginebreda, A.; Postigo, C.; López-Serna, R.; Pérez, S.; Brix, R.; Llorca, M.; de Alda, M. L.; Petrović, M.; Munné, A.; Tirapu, L.; Barceló, D. Wastewater reuse in Mediterranean semi-arid areas: The impact of discharges of tertiary treated sewage on the load of polar micro pollutants in the Llobregat river (NE Spain). *Chemosphere*, v.5, p.670-678, 2011.
- Lemon, K.; Earl, A.; Vlamakis, H.; Aguilar, C.; Kolter, R. Biofilm development with an Emphasis on *Bacillus subtilis*. In: Romeo, T. (Ed.), *Bacterial Biofilms*. Springer-Verlag, v.322, p.1-16, 2008.
- Li, G. B.; Li, Y. K.; Xu, T. W.; Liu, Y. Z.; Jin, H.; Yang, P. L.; Yan, D. Z.; Ren, S. M.; Tian, Z. F. Effects of average velocity on the growth and surface topography of biofilms attached on the reclaimed wastewater drip irrigation system laterals. *Irrigation Science*, v.30, p.103-113, 2012a.
- Li, J. S.; Chen, L.; Li, Y. F. Comparison of clogging in drip emitters during application of sewage effluent and groundwater. *Transactions of the ASABE*, v.52, p.1203-1211, 2009.
- Li, Y. K.; Liu, Y. Z.; Li, G. B.; Xu, T. W.; Liu, H. S.; Ren, S. M.; Yan, D. Z.; Yang, P. L. 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, 2012b.
- Li, Y. K.; Song, P.; Zhou, B. Microbiology mechanism and controlling methods for emitter clogging in the reclaimed water drip irrigation system. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, v.29, p.98-107, 2013a.
- Li, Y. K.; Zhou, B.; Liu, Y. Z.; Jing, Y. G.; Pei, Y. T.; Shi, Z. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water. *Irrigation Science*, v.31, p.557-574, 2013b.
- Li, Y.; Liu, Y.; Li, G.; Xu, T.; Liu, H.; Ren, S.; Yan, D.; Yang, P. 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, 2011.
- Liu, H.; Huang, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. *Agricultural Water Management*, v.96, p.745-756, 2009.
- Liu, Z.; Xiao, Y.; Li, Y.; Zhou, B.; Feng, J.; Han, S.; Muhammad, T. Influence of operating pressure on emitter anti-clogging performance of drip irrigation system with high-sediment water. *Agricultural Water Management*, v.213, p.174-184, 2019.
- Lopes, E. D. O. R.; Weber, O. B.; Crisóstomo, L. A.; Mattos, E. P. N. B. Short-term effects of produced water on microbial activity in semiarid soil. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*, v.3, p.395-403, 2014.

- Mantovani, E. C. AVALIA. Manual do usuário. Viçosa, MG: DEA/UFV–PNP&D/café EMBRAPA, 2002. 100p.
- Mantovani, E. C.; Bernardo, S.; Palaretti, L. F. Irrigação: princípios e métodos. 3.ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355p.
- Marques, B. C. D. Desempenho de unidades gotejadoras operando com diluições de efluentes de laticínios e de água de abastecimento público em escala laboratorial. Mossoró: UFERSA, 2016. 138p. Tese Doutorado
- Marques, B. C. D.; Cunha, V. T.; Cunha, V. T.; Silva, K. B.; Batista, R. O. Desempenho de gotejadores operando com água residuária de laticínios em escala laboratorial. Irriga, v.21, p.140-155, 2016.
- Mélo, R. F.; Coelho, R. D.; Teixeira, M. B. Entupimento de gotejadores convencionais por precipitados químicos de carbonato de cálcio e magnésio, com quatro índices de saturação de Langelier. Irriga, v.13, p.525-539, 2008.
- Merriam, J. L.; Keller, J. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. Logan: Utah State University, 1978.
- Mesquita, F. O.; Alves, S. M. C.; Batista, R. O.; Dantas, T. B.; Souza, L. Drip units operating with dilute landfill leachate. Revista Caatinga, v.29, p.163-172, 2016a.
- Mesquita, F. O.; Alves, S. M. C.; Batista, R. O.; Dantas, T. B.; Souza, L. Desempenho de gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído. Irriga, v.21, p.156-171, 2016b.
- Motta, A. R. P.; Borges, C. P.; Kiperstok, A.; Esquerre, K. P.; Araújo, P. M.; Branco, L. P. N. Tratamento de água produzida de petróleo para remoção de óleo por processos de separação por membranas: revisão. Engenharia Sanitária e Ambiental, v.18, p.15-26, 2013.
- Munirasu, S.; Haija, M. A.; Banat, F. Use of membrane technology for oil field and refinery produced water treatment – A review. Process Safety and Environmental Protection, v.100, p.183-202, 2016.
- Nakayama, F. S.; Boman, B. J.; Pitts, D. Maintenance. In: Lamm, F. R.; Ayars, J. E.; Nakayama, F. S. (Eds.). Microirrigation for crop production: design, operation, and management. Amsterdam: Elsevier, 2006. Cap.11, p.389-430.
- Nascimento, R. C.; Medeiros, P. B. F.; Santos, G. S.; Teles, E. C. P. V. A; Gonçalves, D. R.; Matins, A. P. F. Dinâmica da obstrução de emissores usados na cultura da uva utilizando água salina de poço subterrâneo. Irriga, v. 21, p. 491-502, 2016.
- 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.
- Oliver, M. M. H.; Hewa, G. A.; Pezzaniti, D. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation. Agricultural Water Management, v.133, p.12-23, 2014.

- Pei, Y. T.; Li, Y. K.; Liu, Y. Z.; Zhou, B.; Shi, Z.; Jiang, Y. G. Eight emitters clogging characteristics and its suitability evaluation under on-site reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*, v.32, p.141-157, 2014.
- Pichtel, J. Oil and gas production wastewater: soil contamination and pollution prevention. *Applied and Environmental Soil Science*, 2016. 24p.
- Pimentel Gomes, F. Curso de estatística experimental. 15. Ed. Piracicaba, SP: FEALQ, 2009. 451p.
- Pitts, D. J.; Haman, D. Z.; Smajstla, A. G. Causes and prevention of emitter plugging in microirrigation systems. Gainesville, University of Florida, Florida Cooperative Extension Service, University of Florida, 1990, 258, p.12 (Bulletin).
- Pizarro Cabello, F. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación. 2. ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1990. 471p.
- Portella, A. Y.; Fabianovicz, R. Bacia potiguar: sumário geológico e setores em oferta. Brasil, 14ª Rodada de Licitações de Petróleo e Gás – ANP. (2017). Disponível em: <http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/Round14/Mapas/sumarios/Sumario_Geologico_R14_Potiguar.pdf> Acesso em: 11 de dez. 2017.
- Provenzano, G.; Pumo, D. Experimental analysis of local pressure losses for microirrigation laterals. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v.130, p.318-324, 2004.
- Puig-Bargués, J.; Arbat, G.; Elbana, M.; Duran-Ros, M.; Barragán, J.; Ramírez de Cartagena, F.; Lamm, F. R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. *Agricultural Water Management*, v.97, p.883-891, 2010.
- Qingsong, W.; Gang, L.; Jie, L.; Yusheng, S.; Wenchu, D.; Shuhuai, H. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.63, p.294-303, 2008.
- Ras, M.; Lefebvre, D.; Derlon, N.; Paul, E.; Girbal-Neuhauser, E. Extracellular polymeric substances diversity of biofilms grown under contrasted environmental conditions. *Water Research*, v.45, p.1529-1538, 2011.
- Ravina, I.; Paz, E.; Sofer, Z.; Marcu, A.; Shisha, A.; Sagi, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimer wastewater. *Irrigation Science*, v.13, p.129-139, 1992.
- Ribeiro Júnior, J. I.; Melo, A. L. P. Guia prático para utilização do SAEG. Viçosa-MG: UFV, 2008. 288p.
- Ribeiro, A. C.; Guimarães, P. T. G.; Alvarez, V. H. (Ed.). Recomendações para o uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação. Viçosa, MG: Comissão de fertilidade do solo do estado de Minas Gerais, 1999. 359p.
- Ribeiro, M. D. Técnicas de ultrassom e métodos químicos na desobstrução de gotejadores de irrigação por gotejamento. Campina Grande: UFCG, 2016. 105p. Tese Doutorado

- Ribeiro, P. A. A.; Teixeira, M. B.; Coelho, R. D.; Franco, E. M.; Silva, N. F.; Carvalho, L. C. C.; Alves, M. E. B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Irriga*, Ed. Especial, p.368-379, 2012.
- Ribeiro, T. A. P.; Paterniani, J. E. S. Microaspersores entupidos devido a problemas de ferro na água. *Ciência Rural*, v.38, p.1456-1459, 2008.
- Rice, E. W.; Baird, R. B.; Clesceri, A. D. Standard methods for the examination of water and wastewater. 22. ed. Washington: APHA, AWWA, WPCR, 2012. 1496p.
- Rowan, M.; Mancl, K. M.; Tuovinen, O. H. Evaluation of drip irrigation emitters distributing primary and secondary wastewater effluents. *Irrigation & Drainage Systems Engineering*, v.2, p.1-7, 2013.
- SAEG - Sistema para análises estatísticas versão 9.1 (SAEG). Viçosa: Fundação Arthur Bernardes, UFV, 2007. Disponível em: <<http://www.ufv.br/saeg/>> Acesso em: 28 nov. 2018.
- Shelton, D.R.; Kiefer, L. A.; Pachepsky, Y.A.; Blaustein, R. A.; Martinez, G. Coliform retention and release in biofilms formed on new and weathered irrigation pipes. *Irrigation Science*, v.31, p.971-981, 2013.
- Silva, K. B.; Batista, R. O.; Mesquita, F. O.; Coelho, D. C. L.; Santos, W. O. Empirical models for performance of drippers applying cashew nutprocessing waste water. *Revista Caatinga*, v. 29, p.405-414, 2016.
- Silva, K. B.; Silva Júnior, M. J.; Batista, R. O.; Santos, D. B.; Batista, R. O.; Lemos Filho, L. C. A. Irrigação por gotejamento com água residuária tratada da indústria da castanha de caju sob pressões de serviço. *Semina*, v.35, p.695-706, 2014.
- Silva, K. B.; Silva Júnior, M. J.; Batista, R. O.; Santos, D. B.; Barbosa Filho, S. Desempenho de gotejadores operando com efluente da castanha de caju sob distintas pressões de serviço. *Revista Ceres*, v.60, p.339-346, 2013.
- Silva, P. F.; Matos, R. M.; Lima, S. C.; Dantas Neto, J.; Lima, V. L. A. Obstrução e uniformidade em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando águas residuais tratadas. *Revista Ceres*, v.64, p.344-350, 2017.
- Song, P.; Li, Y.; Zhou, B.; Zhou, C.; Zhang, Z.; Li, J. Controlling mechanism of chlorination on emitter bio-clogging for drip irrigation using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, v.184, p.36-45, 2017.
- Sousa, A. F.; Crisostomo, L. A.; Weber, O. B.; Escobar, M. E. O.; Oliveira, T. S. Nutrient content in sunflower irrigated with produced water. *Revista Caatinga*, v.29, p.94-100, 2016.
- Sousa, V. F.; Marouelli, W. A.; Coelho, E. F.; Pinto, J. M.; Coelho Filho, M. A. Irrigação e fertirrigação em fruteiras e hortaliças. Embrapa: Informação Tecnológica, Brasília, 2011, 771p.
- Souza Filho, F. A. A. política nacional de recursos hídricos: Desafios para sua implantação no semiárido brasileiro. In: Medeiros, S. S.; Gheyi, H. R.; Galvão, C. O.; Paz, V. P. S. Recursos

- hídricos em regiões áridas e semiáridas. Campina Grande, PB: Instituto Nacional do Semiárido, v.1, p.1-25, 2011.
- Souza, J. A. A.; Batista, R. O.; Ramos, M. M.; Soares, A. A. Contaminação microbiológica do perfil do solo com esgoto sanitário. *Acta Scientiarum. Technology*, v.33, p.5-8, 2011.
- Souza, J. A. R.; Astoni, D. M. Efeitos da aplicação de esgoto sanitário submetidos a diferentes níveis de tratamento em sistemas de irrigação localizada. *Engenharia Ambiental*, v.9, p.145-158, 2012.
- SPE. Challenges in reusing produced water: SPE white paper. Society of Petroleum Engineers, p.1-6, 2011. Disponível em: <http://www.spe.org/industry/challenges-in-reusing-produced-water.php> (Acessado em: 18 Abr. de 2018).
- Stanic, J. Unconventional oil and gas production drives trends in water management and treatment. *Global Water Intelligence*, v.3, p.10-15, 2014.
- Stewart, M.; Arnold, K. Produced water treating systems: Part 1. In: *Produced water treatment field manual*. [S.l.: s.n.], p.1-134, 2011.
- Szekut, F. D.; Santos, D. B.; Azevedo, C. A. V.; Klein, M. R.; Ribeiro, M. D.; Medeiros, S. S. Emitter clogging in drip irrigation using treated domestic wastewater. *Journal of Food, Agriculture & Environment*, v.13, p.60-66. 2015.
- Travis, M. J.; Weisbrod, N.; Gross, A. Decentralized wetland-based treatment of oil-rich farm wastewater for reuse in an arid environment. *Ecological Engineering*, v.39, p.81-89, 2012.
- Vale, H. S. M.; Batista, R. O.; Costa, D. O.; Lemos Filho, L. C. A.; Santos, D. B.; Silva, P. C. M. Detecção do entupimento em gotejadores aplicando percolado de aterro sanitário diluído. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, v.11, p.975-993, 2018a.
- Vale, H. S. M.; Costa, D. O. C.; Batista, R. O. B.; Coelho, D. C. L.; Feitosa, A. P. Hydraulic Performance of drippers applying sanitary landfill leachate diluted in water. *Revista Caatinga*, v.31, p.987-996, 2018b.
- Weber, O. B.; Crisóstomo, L. A.; Miranda, F. B.; Sousa, A. F.; Mesquita, A. L. M.; Cabral, J. E. O. Production of ornamental sunflower irrigated with oilfield produced water in the Brazilian semiarid region. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.52, p.443-454, 2017.
- Wei, Z.; Tang, Y.; Zhao, W.; Lu, B. Rapid structural design of drip irrigation emitters based on RP technology. *Rapid Prototyping Journal*, v.13, p.268-275, 2007.
- Wu, D.; Li, Y.; Liu, H.; Yang, P.; Sun, H.; Liu, Y. Simulation of the flow characteristics of a drip irrigation emitter with large eddy methods. *Mathematical and Computer Modelling*, v.58, p.497-506, 2013.
- Wu, I. P. An assessment of hydraulics design of micro-irrigation systems. *Agricultural Water Management*, v.32, p.275-284, 1997.
- Yan, D.; Bai, Z.; Rowan, M.; Gu, L.; Shumei, R.; Yang, P. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. *Journal of Environmental Sciences*, v.21, p.834-841, 2009.

- Zhang, J.; Zhao, W.; Tang, Y.; Lu, B. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels. *Computers and Electronics in Agriculture*. v.74, p.59-65, 2010.
- Zhang, J.; Zhao, W.; Tang, Y.; Lu, B. Structural optimization of labyrinth-channel emitters based on hydraulic and anti-clogging performances. *Irrigation Science*, v.29, p.351-357, 2011.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Liu, Y. Z.; Pei, Y. T.; Jiang, Y. G.; Liu, H. L. Effects of flow path depth on emitter clogging and surface topographical characteristics of biofilms. *Irrigation and Drainage*, v.63, p.46-58, 2014.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Liu, Y. Z.; Xu, F. P.; Pei, Y. T.; Wang, Z. H. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water. *Irrigation Science*, v.33, p.221–234, 2015a.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Pei, Y. T.; Liu, Y. Z.; Zhang, Z. J.; Jiang, Y. G. Quantitative relationship between biofilms components and emitter clogging under reclaimed water drip irrigation. *Irrigation Science*, v.31, p.1251-1263, 2013.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Pei, Y. T.; Yang, P. L.; Jiang, Y. G. Emitter clogging sensibility with increasing biofilm components under reclaimed water drip irrigation condition. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, v.31, p.146-151, 2015b.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Song, P.; Wang, T. Z.; Jiang, Y. G.; Liu, H. L. Formulation of an emitter clogging control strategy for drip irrigation with reclaimed water. *Irrigation and Drainage*, v.65, p.451-460, 2016a.
- Zhou, B.; Li, Y. K.; Song, P.; Xu, Z.; Bralts, V. A kinetic model for biofilm growth inside non-PC emitters under reclaimed water drip irrigation. *Agricultural Water Management*, v.168, p.23-34, 2016b.
- Zhou, B.; Wang, T. Z.; Li, Y. K.; Bralts, V. Effects of microbial community variation on bio-clogging in drip irrigation emitters using reclaimed water. *Agricultural Water Management*, v.194, p.139-149, 2017.