



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Entupimento e Uniformidade de Distribuição em Unidades Gotejadoras Operando com Efluente Sanitário Tratado

Danniely de Oliveira Costa¹, Hudson Salatiel Marques Vale², Silvanete Severino da Silva³, Rafael Oliveira Batista⁴, Tereza Amelia Lopes Cizenando Guedes Rocha⁵

¹Dra. Pesquisadora, Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Mossoró, Rio Grande do Norte. (84) 3317-1460. danniely_oliveira@hotmail.com. ²Dr. Pesquisador, Programa de Pós-Graduação em Manejo de Solo e Água, Universidade Federal Rural do Semi-Árido, campus Mossoró, Rio Grande do Norte. (84) 3317-1460. klaus_angel@hotmail.com. ³Professora Adjunta, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Unidade Acadêmica de Belo Jardim, Belo Jardim, Pernambuco. (81) 3320-6930. silvanete.silva@ufrpe.br (autor correspondente). ⁴Professor Dr. Associado IV, Departamento de Engenharia e Ciências Ambientais da Universidade Federal Rural do Semiárido (UFERSA), Mossoró, Rio Grande do Norte. (84) 3317-1594 rafaelbatista@ufersa.edu.br. ⁵Professora EBT Engenharia Ambiental, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Pará, Parauapebas, Pará. (91) 3342-0558. tereza.cizenando@ifpa.edu.br.

Artigo recebido em 08/07/2023 e aceito em 22/05/2024

RESUMO

Objetivou-se, com este trabalho, monitorar agentes físico-químicos e microbiológicos ocasionadores de obstrução e a uniformidade de distribuição em unidades gotejadoras aplicando efluente sanitário tratado. Para isso, o experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado com 12 repetições em esquema de parcelas subdivididas, tendo nas parcelas, os tipos de emissores (G1, G2 e G3) e nas subparcelas, os tempos de operações (0, 80, 160, 240, 320 e 400 h). A cada 80 h de operação das unidades gotejadoras foram calculados os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD); e obtidos em laboratórios, os valores de pH, sólidos suspensos totais (SST), sólidos dissolvidos totais (SDT), ferro total (Fe), manganês total (Mn), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}) e coliformes totais (CT). Os dados foram submetidos às análises descritiva e de variância, teste de média e regressão simples. O risco de obstrução de gotejadores em relação à qualidade do efluente foi severo para pH e SDT, moderado para SST, Fe, Mn e Mg^{2+} e menor para Mg^{2+} e CT. A análise temporal e o desvio padrão amostral de CUC e CUD permitiram classificar a suscetibilidade ao entupimento por biofilme dos emissores em: $G1 > G3 > G2$. O CUD foi mais sensível na detecção do entupimento por biofilme em gotejadores, do que o CUC. Houve alteração significativa do CUC e CUD, ao longo do tempo de operação, apenas na unidade gotejadora com emissor G1.

Palavras-Chave: Reúso de água, Esgotamento sanitário, Eficiência da irrigação.

Clogging And Uniformity of Distribution in Drip Units Operating With Treated Sanitary Sewage

ABSTRACT

The objective of this work was to monitor physical-chemical and microbiological agents that cause obstruction and distribution uniformity in drip units by applying treated sanitary effluent. For this, the experiment was set up in a completely randomized design with 12 replications in a split plot scheme. Having in the plots, the types of emitters (G1, G2 and G3) and in the subplots, the operating times (0, 80, 160, 240, 320 and 400 h). Every 80 h of operation of the drip units the Christiansen uniformity (CU) and distribution uniformity (DU) coefficients were calculated; and obtained in laboratories, the pH, total suspended solids (TSS), total dissolved solids (TDS), total iron (Fe), total manganese (Mn), calcium (Ca^{2+}), magnesium (Mg^{2+}) and total coliforms (TC) values. The data were submitted to descriptive and variance analysis, mean test and simple regression. The risk of dripper obstruction in relation to the quality of the effluent was severe for pH and TDS, moderate for TSS, Fe, Mn and Mg^{2+} and lower for Mg^{2+} and TC. The temporal analysis and the sample standard deviation of CU and DU allowed to classify the susceptibility to biofilm clogging of emitters in: $G1 > G3 > G2$. DU was more sensitive in detecting biofilm clogging in drippers than CU. There was a significant change in CU and DU, throughout the operation time, only in the drip unit with emitter G1.

Keywords: Water reuse, Sanitary sewage, Irrigation efficiency.

Introdução

O esgotamento sanitário compreende as ações de coleta, tratamento e disposição final dos resíduos líquidos de áreas urbanas e rurais, sendo que sua ausência favorece o surgimento de diversos impactos socioambientais. No meio antrópico contribui para a mortalidade infantil, o surgimento de doenças intestinais e problemas gestacionais, resultando em prejuízos a cognição das crianças o que afeta o seu rendimento escolar e dos adultos comprometendo o seu desempenho no trabalho (Chandana e Rao, 2021; Zheng et al., 2023). No meio abiótico, os esgotos sem tratamento causam a eutrofização e o assoreamento dos corpos hídricos superficiais, bem como a contaminação físico-química e microbiológica de suas águas (Ferreira et al., 2021; Furtado et al., 2021).

Com relação aos serviços de esgotamento sanitário no Brasil não existe ainda a universalização, os índices de atendimento à população são baixos e preocupantes, 55% dos municípios possuem rede coletora de águas residuárias domiciliares, e apenas 50,8% desse resíduo líquido gerado é tratado; na região nordeste e no estado do Rio Grande do Norte, a situação se agrava ainda mais, pois 30,3 e 33,3% do município possuem rede coletora e somente 34,1 e 32,6% das águas residuárias domésticas geradas são tratadas, respectivamente (BRASIL, 2022).

Águas residuárias tratadas representam uma fonte de água e nutrientes disponível para uso em fertirrigação, mesmo durante os períodos de estiagem; o que torna o reúso de água um importante componente da gestão integrada dos recursos hídricos para mitigação da escassez hídrica e inadequação do esgotamento sanitário, mas ainda incipiente no semiárido brasileiro e com regulamentação, ainda, incompleta (Cavalcante et al., 2021; Mainardis et al., 2022; Radini et al., 2023).

O sistema de irrigação por gotejamento é uma importante alternativa tecnológica para o uso eficiente de recursos hídricos em ambientes semiáridos; quando bem projetado e manejado possibilita economia de água e energia elétrica, maiores rendimentos das culturas e minimização das perdas por evaporação, percolação e o escoamento superficial e dos

riscos de contaminação microbiológica dos produtos agrícolas (Ait-Mouheb et al., 2022; Dhayal et al., 2023; Fu et al., 2021).

Entretanto, o entupimento de emissor é um gargalo que restringe a aplicação e a popularização da tecnologia de irrigação por gotejamento, pode ser de natureza física, química e/ou biológica, ocorrendo dentro dos canais dos gotejadores, que possuem seção transversal da ordem de 1 mm² (Petit et al., 2022; Shen et al., 2022). O entupimento do emissor é um processo complexo que é afetado pela interação de vários fatores, quando da aplicação de águas residuárias, a obstrução está fortemente relacionada à formação de biofilmes oriundos da interação entre agentes físicos, químicos e biológicos (Duran-Ros et al., 2022; Ramachandrala e Kasa, 2022).

Os biofilmes são sistemas complexos, com alto nível de organização entre diferentes grupos biológicos, que geralmente apresentam substância polimérica extracelular que conferem elasticidade física, permitindo que toda a matriz resista a altas taxas de fluxo de água residuária e às forças de convecção e de tensão de cisalhamento relacionadas à operação dos sistemas de irrigação por gotejamento (Li et al., 2023; Wang et al., 2022; Wang et al., 2021; Xiao et al., 2021; Zhang et al., 2022). O entupimento dos emissores acarreta redução da uniformidade de aplicação do efluente e, consequentemente, da eficiência de irrigação (Maroufpoor et al., 2021; Muhammad et al., 2021; Shi et al., 2022).

Entre os diversos indicadores empregados na avaliação do desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento, estão os tradicionais coeficientes de Uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD), sendo inclusive utilizados em ensaios experimentais com águas residuárias (Lili et al., 2021; Liu et al., 2022; Paiva et al., 2024; Solé-Torres et al., 2021).

Diante o exposto, objetivou-se com este trabalho monitorar agentes físico-químicos e microbiológicos ocasionadores de obstrução para emissores, bem como e a uniformidade de distribuição em unidades gotejadoras que operaram com efluente sanitário tratado.

Material e métodos



Figura 1. Imagem de satélite da Unidade Experimental de Reuso de Água (UERA) localizada no campus leste da UFERSA, Mossoró-RN.

Na UERA (Figura 1) foi construída uma bancada experimental em alvenaria com os seguintes componentes: plataforma de ensaios de 16 m² (2 x 8 m), com piso impermeabilizado (1); canaleta lateral, com 2% de declividade para recirculação do efluente (2); e reservatório de 5 m³ (3). Sobre plataforma de ensaios foram montadas quatro unidades gotejadoras (UG1, UG2, UG3 e UG4) constituídas por: uma motobomba de 1 cv (4); um filtro de tela com

abertura de 130 µm (5); um hidrômetro de 1,5 m³ h⁻¹ (6); quatro linhas principais e de derivação em PVC de 32 mm (7); quatro unidades reguladoras de pressão, com registro de gaveta e manômetro analógico (8); 36 linhas laterais, em polietileno de 16 mm de 8 m de comprimento, com três tipos de gotejadores (9), conforme ilustrado na Figura 2.

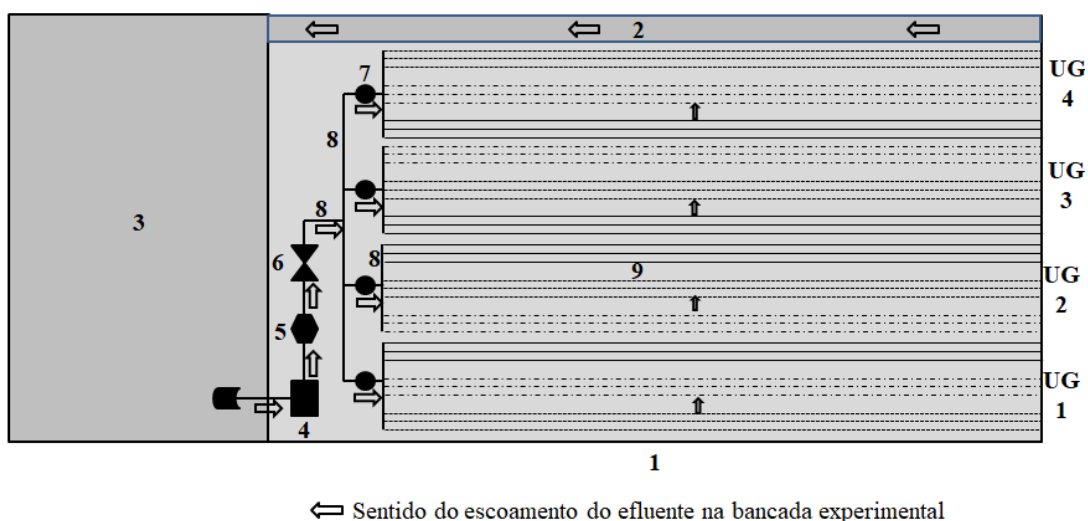
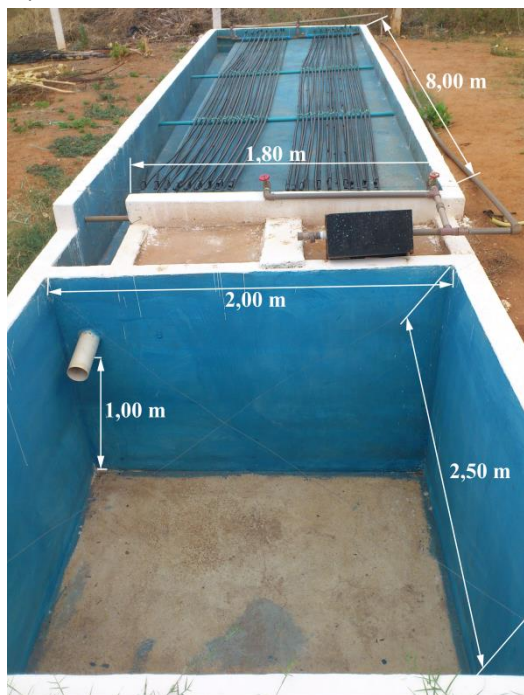


Figura 2. Esquematização da bancada experimental.

Na linha de derivação de cada unidade gotejadora foram inseridos nove borrachas de vedação, com respectivo conector para inserção de linha lateral em polietileno de 16 mm. Para cada tipo de emissor foram utilizadas três linhas laterais, totalizando nove linhas laterais por

A.



unidade gotejadora. A distribuição dos tipos de emissores nas unidades gotejadoras foi realizada ao acaso (Figura 3).

B.



Figura 3. Bancada experimental para montagem das unidades de irrigação: reservatório e plataforma em alvenaria, linhas laterais, linhas de derivação (A), depósito para armazenamento da solução com bactérias, conjuntos motobomba, filtro e hidrômetro (B).

Na Tabela 1 estão apresentadas as características técnicas dos três tipos de emissores de escoamento turbulento, sendo dois

não autocompensantes (G1 e G2) e um autocompensante (G3).

Tabela 1. Características técnicas dos (G) utilizados nos ensaios experimentais

G	$q^{(1)}$ (L h ⁻¹)	$k^{(1)}$	$x^{(1)}$	AF (mm ²)	CL (mm)	CV _f ⁽¹⁾ (%)	FP ⁽¹⁾ (kPa)	E ⁽¹⁾ (m)
G1	1,65	0,53	0,48	4,0 ⁽²⁾	37 ⁽²⁾	± 5	60 - 150	0,30
G2	2,00	0,69	0,46	70,0 ⁽¹⁾	75 ⁽¹⁾	± 7	100 - 300	0,40
G3	2,00	2,00	0,00	2,0 ⁽¹⁾	35 ⁽¹⁾	± 7	50 - 400	0,70

Nota: F – fabricante; q - vazão nominal; k - coeficiente de vazão; x - expoente da vazão; AF - área de filtragem; CL - comprimento do labirinto; CV_f - coeficiente de variação de fabricação; FP - faixa de pressão recomendada pelo fabricante; E - espaçamento entre emissores na linha lateral; ⁽¹⁾ Informações dos fabricantes; e ⁽²⁾ Informações medidas com paquímetro digital.

O experimento foi montado no delineamento inteiramente casualizado com 12

repetições em esquema de parcelas subdivididas. Tendo nas parcelas, os tipos de

emissores (G1, G2 e G3) e nas subparcelas, os tempo de operação (0, 80, 160, 240, 320 e 400 h).

A água residuária sanitária foi coletada, a cada 80 h de operação das unidades gotejadoras durante 400 h, da lagoa de maturação de uma Estação de Tratamento de Efluentes localizada em Mossoró-RN. Nos mesmos períodos foram coletadas amostras compostas do efluente tratado e preservadas, em caixas isotérmicas com gelo à temperatura de 4°C, até a entrada nos laboratórios. Nos laboratórios foi realizada a caracterização físico-química e microbiológica, seguindo as recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (Baird et al., 2017).

No Laboratório de Análise de Solo, Água e Planta (LASAP) e no Laboratório de Saneamento Ambiental (LSA) localizados na UFRSA, foram realizadas as análises de: pH, condutividade elétrica (CE), sólidos dissolvidos totais (SDT), sólidos suspensos totais (SST), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), ferro total (Fe) e manganês total (Mn). Já os níveis populacionais de coliformes totais (CT) foram realizados no Centro de Análises Clínicas e Imunológicas de Mossoró (CACIM).

Para calcular os coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD), representados pelas Equações 1 e 2, utilizou-se a vazão medida em 10 emissores equidistantes ao longo de cada linha lateral. A vazão de cada gotejador foi obtida pelo método gravimétrico, coletando-se o volume de efluente aplicado em um período de três minutos.

$$\text{CUC} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n |q_i - \bar{q}|}{n_e \cdot \bar{q}} \right) \quad (1)$$

em que:

CUC - coeficiente de uniformidade de Christiansen, %;

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.

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

em que:

CUD - coeficiente de uniformidade de distribuição, %;

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

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

As unidades gotejadoras funcionaram, em média, oito horas por dia até completar o tempo de operação total de 400 h, para potencializar a formação de biofilme nos gotejadores e nas linhas laterais. Neste período, efetuaram-se seis avaliações do desempenho hidráulico das unidades gotejadoras com efluente sanitário tratado, especificamente nos tempos de operações de 0, 80, 160, 240, 360 e 400 h.

Para analisar qualitativamente os dados de CUC e CUD utilizou-se a classificação proposta por Merriam e Keller (1978), onde valores maiores que 90%, são classificados como excelentes; entre 80 e 90%, bons; 70 e 80%, regulares, e menor que 70%, ruins.

Com o auxílio de registros de gaveta e manômetros analógicos, a pressão de serviço foi mantida em 100 kPa, para obter os valores de vazões nominais nos gotejadores ensaiados. No tempo de operação inicial (0 h), quando não houve obstrução, as variações de vazão entre os gotejadores encontraram-se na faixa de $\pm 7\%$.

Utilizou-se a estatística descritiva, obtendo-se média e desvio padrão aritméticos, dos atributos físico-químicos, enquanto para o nível populacional de coliformes totais foi calculada a média e desvio padrão geométrico.

Na avaliação estatística dos dados de CUC e CUD utilizou-se a análise de variância, a 5% de probabilidade pelo teste F; o teste de Tukey, à 10% de probabilidade, para comparação das médias; e a análise de regressão simples, onde os modelos de regressão foram escolhidos com base na significância dos coeficientes de regressão, aplicando-se o teste t num nível de até 10%, e no coeficiente de determinação ($R^2 \geq 80\%$). O teste de média e a análise de regressão foram utilizados no desdobramento da interação Tempo de Operação (TO) versus Tipo de Gotejador (TG).

Decorrida as 400 h de operação das unidades gotejadoras com emissores G1, G2 e G3, fez-se o corte em três linhas laterais, selecionando-se o último gotejador avaliado de cada linha para retirada de emissor entupido e, paralelamente, realizou-se o registro fotográfico dos mesmos.

Resultados e discussão

Os valores dos atributos físico-químicos e microbiológico da água residuária sanitária tratada oscilam, ao longo das 400 h de operação das unidades gotejadoras, conforme apresentado na Tabela 2. Este fato é atribuído aos mecanismos do tratamento biológico que ocorre na lagoa de maturação

(degradação dos materiais orgânicos, consumo e produção de dióxido de carbono e oxigênio dissolvido por microrganismos) e variações climáticas (precipitação pluviométrica, radiação solar, temperatura do ar e velocidade dos ventos) e temporais das vazões e cargas orgânicas.

Tabela 2. Atributos físico-químicos e microbiológico da água residuária sanitária tratada, ao longo do tempo de operação das unidades gotejadoras e respectiva análise descritiva e classificação do risco de obstrução de gotejadores

Atributos	Tempo de operação (h)						Média e desvio padrão	Classificação pela média
	0	80	160	240	320	400		
pH	7,74	7,82	7,85	7,74	8,15	8,37	7,95 ± 0,24	Severo ^(a)
SST (mg L ⁻¹)	106	76	110	87	116	98	99 ± 14	Moderado ^(a)
SDT (mg L ⁻¹)	3321	2655	2490	4330	4403	4428	3604 ± 823	Severo ^(a)
Fe (mg L ⁻¹)	0,25	0,26	0,29	0,30	0,42	0,52	0,34 ± 0,10	Moderado ^(a)
Mn (mg L ⁻¹)	0,11	0,10	0,12	0,16	0,14	0,20	0,14 ± 0,03	Moderado ^(a)
Ca ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	5,20	4,20	4,40	7,20	6,50	6,40	5,65 ± 1,12	Menor ^(b)
Mg ²⁺ (mmol _c L ⁻¹)	1,80	0,80	2,40	2,30	2,80	2,70	2,13 ± 0,68	Moderado ^(b)
CT (UFC mL ⁻¹)	1000	7000	1500	1600	1200	800	1590 ± 2*	Menor ^(a)

Nota: SST - Sólidos suspensos totais; SDT - Sólidos dissolvidos totais; CT - Coliformes totais; UFC - Unidades formadoras de colônias; * Média e desvio padrão geométrico; ^(a) De acordo com Nakayama et al. (2007); ^(b) De acordo com Capra e Scicolone (1998).

Analisando conjuntamente os valores de pH, SDT, Fe, Mn, Ca²⁺ e Mg²⁺, nota-se que, em geral, seus valores aumentam com tempo de operação das unidades gotejadoras, devido provavelmente ao aumento da evaporação na lagoa de maturação que acarretou a concentração de íons no meio líquido. Enquanto, a população de coliformes totais, a partir das 80 h, decresce e atinge valor mínimo no tempo de 400 h, indicando que o aumento na concentração de íons reduziu a atividade de bactérias no meio líquido. Em relação ao SST houve oscilação, ao longo do período experimental, esse atributo está mais relacionado com as variações da vazão e das

cargas orgânicas que entram na lagoa de maturação.

Com base nos valores médios dos atributos físico-químicos e microbiológico da água residuária sanitária tratada, os riscos de obstrução de gotejadores foi classificado como severo para pH e SDT, moderado para SST, Fe, Mn e Mg²⁺ e menor para Ca²⁺ e CT, utilizando os critérios propostos por Capra e Scicolone (1998) e Nakayama et al. (2007). Estes resultados diferem dos encontrados por Batista et al. (2011) em seu estudo com unidades gotejadoras, operando com água residuária sanitária tratada durante 500 h, em Viçosa-MG; onde os riscos de obstrução de gotejadoras

foram classificados como severo para pH, SST, Fe e CT e menor para SDT, Mn, Ca^{2+} e Mg^{2+} .

A análise de variância, apresentada na Tabela 3, dos coeficientes de uniformidade de Christiansen (CUC) e de uniformidade de distribuição (CUD) no esquema de parcelas

subdivididas revela que a interação TO x TG foi significativa ($p < 0,01$) e que os coeficientes de variação da subparcela foram de 13,35 e 20,44%, respectivamente.

Tabela 3. Resumo na análise de variância do CUC e CUD no esquema de parcelas subdivididas e respectivos coeficientes de variação da parcela e subparcela

Fontes de variação	Graus de liberdade	Quadrado médio	
		CUC	CUD
Tipos de gotejadores (TG)	2	20027,65**	63419,99**
Resíduo (a)	22	920,99	1383,74
Tempo de operação (TO)	5	1652,53**	5298,54**
TO x TG	10	1003,68**	2966,13**
Resíduo (b)	176	128,37	217,48
Coeficiente de variação da parcela (CVp) em %		35,76	51,55
Coeficiente de variação da subparcela (CVsp) em %		13,35	20,44

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

No trabalho desenvolvido por Mesquita et al. (2015) com unidades gotejadoras, operando com percolado de aterro sanitário diluído durante 160 h, a interação TO x TG foi não significativa para o CUC ($p < 0,05$) e significativa para o CUD ($p < 0,05$), enquanto os coeficientes de variação da subparcela foram de 6,49 e 14,69%, respectivamente, menores que o do presente estudo devido aos maiores níveis de obstrução nos gotejadores proporcionado pelos agentes físico-químicos e microbiológicos da água residuária sanitária tratada e as características construtivas dos emissores.

Evidencia-se, na Tabela 4, o desdobramento da interação TO x TG para a variável CUC empregando-se teste de média e análise de regressão. Para o teste de média, ao fixar o fator Tipo de Gotejador, nota-se que houve redução significativa ($p < 0,10$) do CUC ao longo do Tempo de Operação apenas na unidade gotejadora G1, devido à sua maior suscetibilidade ao entupimento por biofilme; fato esse que não foi evidenciado nas unidades gotejadoras com emissores G2 e G3, mais

resistentes à obstrução por biofilme. Fixando o fator Tempo de Operação, evidencia-se diferença estatística do CUC de G1 em relação a G2 e G3 de 80 h até 400 h de operação.

Constata-se que a maior desuniformidade de aplicação do efluente ocorre em G1 e no tempo de operação de 80 h; nesse tempo o nível populacional de coliformes totais foi o mais elevado (Tabela 2), que provavelmente potencializou a formação de biofilme nesse tipo de emissor com menor vazão nominal ($1,65 \text{ L h}^{-1}$) e menor área de filtração (4 mm^2) em relação a G2 que foi o emissor mais resistente ao entupimento (Tabela 1). Percebe-se, também, a partir de 80h mudança na classificação do CUC proposta por Merriam e Keller (1978), em função da intensificação do entupimento por biofilme, assim em 80% do tempo de operação dessa unidade gotejadora, a uniformidade de aplicação de efluente foi classificada como ruim.

Tabela 4. Valores médios, resultantes de 12 repetições, do coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), obtidos a cada 80 h de operação das unidades gotejadoras aplicando água residuária sanitária tratada e respectivo teste de média, classificação do CUC e modelos de regressão.

Teste de média ⁽¹⁾ do CUC (%)			
Tempo de operação (h)	Tipo de gotejador ⁽²⁾		
	G1	G2	G3
0	97,73aA (Excelente)	96,75aA (Excelente)	98,10aA (Excelente)
80	51,18bB (Ruim)	97,04aA (Excelente)	97,80aA (Excelente)
160	67,86bB (Ruim)	96,66aA (Excelente)	96,47aA (Excelente)
240	60,86bB (Ruim)	96,04aA (Excelente)	90,26aA (Excelente)
320	58,38bB (Ruim)	95,21aA (Excelente)	91,64aA (Excelente)
400	57,89bB (Ruim)	92,33aA (Excelente)	85,25aA (Bom)
Desvio padrão (%)	27,03	2,91	11,06
Modelos de regressão simples			
Tipo de gotejador	Tipo de equação		R ²
G1	$C\hat{U}C = 59,13 + 19,29^{**}(T + 0,50)^{-1}$ $0 \leq T \leq 400$		0,90
G2	$C\hat{U}C = C\bar{U}C = 95,67$		-
G3	$C\hat{U}C = C\bar{U}C = 93,25$		-

Nota: ⁽¹⁾ Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas colunas, para cada tempo de operação, e maiúscula nas linhas, para cada tipo de gotejador, não diferem entre si, a 10% de probabilidade, pelo teste de Tukey; ⁽²⁾ Merriam e Keller (1978); e ** significativos a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Ainda em relação a unidade gotejadora com emissor G1, nota-se que a máxima uniformidade de aplicação do efluente ocorre no tempo de operação inicial (0 h), sendo classificada como excelente, enquanto a maior redução de CUC, no valor de 48%, ocorre às 80 h. Constata-se, também, um aumento de 33% no valor do CUC na transição do tempo de operação de 80 h para 160 h, em função do processo de desobstrução aleatória ocasionada pela movimentação das linhas laterais, nos momentos de avaliação do desempenho hidráulico; variação de temperatura; desprendimento de fragmentos do biofilme; e o próprio mecanismo de autolimpeza do emissor.

Estes resultados corroboram com os de Mesquita et al. (2015) obtidos em unidades gotejadoras aplicando percolado de aterro sanitário durante 160 h; dentre os gotejadores ensaiados, o mesmo emissor G1 não autocompensante de 1,65 L h⁻¹ do presente

trabalho também foi o mais suscetível ao entupimento; além disso sua máxima redução de CUC não ocorre no tempo de operação final e houve o processo de desobstrução aleatória ao longo do período experimental.

Deve-se ressaltar que a melhoria no desempenho do emissor G1 é alcançada aumentando-se o valor da pressão de serviço, conforme recomendado no trabalho desenvolvido por Batista et al. (2018) com unidades gotejadoras aplicando efluente da castanha de caju sob diferentes pressões de serviço; onde constata-se que pressões de serviço de 140, 210 e 280 kPa minimizam a obstrução por biofilme no emissor G1, pois pressões de serviço menores (< 140 kPa) favorecem a adesão de bactérias no interior dos emissores e das linhas laterais, bem como a sedimentação de partículas em suspensão, o que provavelmente ocorre no presente estudo pois

trabalhou-se com pressão de serviço de 100 kPa.

Ao longo das 400 h de operação da unidade gotejadora G2 não houve desuniformidade de aplicação de efluente, pois todos os valores médios de CUC foram classificados por Merriam e Keller (1978) como excelentes, devido à menor suscetibilidade ao entupimento por biofilme desse tipo de emissor. Fato esse atribuído à maior vazão nominal ($2,00 \text{ L h}^{-1}$), juntamente com G3, e maior área de filtragem de (70 mm^2) em relação a G1 e G3 (Tabela 1). A máxima redução do CUC, valor de 5%, é obtida no tempo de operação final (400 h), inferior aos 4% de redução no CUC encontrado por Batista et al. (2010) em seu estudo com sistema de irrigação por gotejamento, dotado de emissor não autocompensante de $2,3 \text{ L h}^{-1}$, que operou com água residuária sanitária tratada, durante 120 h.

Nota-se na unidade gotejadora G3 que em 80% do tempo de operação, o CUC foi classificado como excelente e em apenas 20% o mesmo foi classificado com bom, conforme o critério proposto por Merriam e Keller (1978). Apesar da mudança de classificação no tempo de 400 h, os níveis de obstrução por formação de biofilme foram baixos, e não comprometeram a uniformidade de aplicação de efluente nessa unidade gotejadora. Em relação à suscetibilidade a obstrução, o emissor G3 ocupa uma posição intermediária em relação a G1 e G2, pois apresenta a maior vazão nominal ($2,00 \text{ L h}^{-1}$), juntamente com G2, dentre os três tipos de emissores ensaiados, entretanto possui a menor área de filtragem (2 mm^2) que favorece a formação de biofilme. Houve redução máxima de 13% no valor do CUC ao final do período experimental (400 h).

Estes resultados diferem dos apresentados por Mesquita et al. (2015) em seu trabalho com unidades gotejadoras, aplicando percolado de aterro sanitário diluído durante 160 h; onde a unidade gotejadora, dotada do mesmo emissor G3 não autocompensante de $2,00 \text{ L h}^{-1}$, apresentou redução do CUC de apenas 1%, ao longo do período experimental, sendo todos os valores de CUC classificados como excelentes.

Analisando o desvio padrão dos valores de CUC em cada unidade gotejadora, percebe-se que a dispersão dos valores de CUC em torno

da média foi maior em G1, indicando sua maior suscetibilidade ao entupimento por biofilme em relação a G2 e G3. Enquanto, o menor desvio padrão ocorreu em G2 e o desvio padrão intermediário em G3.

Com relação ao CUC em função dos tempos de operações, da unidade gotejadora com emissor G1, o modelo de regressão hiperbólico de primeiro grau foi o que melhor se ajustou aos dados (Tabela 4), tendo coeficiente de determinação (R^2) de 0,90. O melhor ajuste do modelo hiperbólico é devido provavelmente à maior suscetibilidade ao entupimento desse emissor e à queda abrupta do CUC às 80 h. A análise de regressão simples, também, revelou que a média foi a melhor representação para a relação entre os dados de CUC e o tempo de operação das unidades gotejadoras dotadas dos emissores G2 e G3. Nesse caso, não houve redução significativa ($p < 0,10$) do CUC com o tempo, não tendo assim ajuste de modelos de regressão a esses dados.

Estes resultados não corroboram com os obtidos por Batista et al. (2014) em unidades gotejadoras operando com proporções de tempo de irrigação com efluente suíno e água de poço durante 160 h; onde modelos quadrático e a média foram os que melhor se ajustaram aos dados de CUC em função do tempo de operação e os valores de R^2 oscilaram de 0,80 a 0,99.

Na Tabela 5 constam os resultados do desdobramento da interação Tempo de Operação (TO) *versus* Tipo de Gotejador (TG) utilizando-se teste de média e análise de regressão. Analisando o fator Tipo de Gotejador, evidencia-se redução significativa ($p < 0,10$) do CUD da unidade gotejadora com emissor G1, quando o Tempo de Operação inicial (0 h) é comparado aos demais; entretanto o CUD das unidades gotejadoras dotadas dos emissores G2 e G3 não apresentou alteração significativa ($p < 0,10$) ao longo do período experimental. Ao analisar o fator Tempo de Operação, verifica-se que o CUD das unidades gotejadoras G1, G2 e G3 não diferem estatisticamente ($p < 0,10$) no tempo de operação inicial (0h); mas nos demais tempos de operações houve redução significativa ($p < 0,10$) do CUD da unidade gotejadora G1 em relação às demais unidades gotejadoras.

Tabela 5. Valores médios, resultantes de 12 repetições, do coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), obtidos a cada 80 h de operação das unidades gotejadoras aplicando água residuária sanitária tratada e respectivo teste de média, classificação do CUD e modelos de regressão.

Teste de média⁽¹⁾ do CUD (%)			
Tempo de operação (h)	Tipo de gotejador⁽²⁾		
	G1	G2	G3
0	96,18aA (Excelente)	92,43aA (Excelente)	97,32aA (Excelente)
80	21,47bB (Ruim)	94,17aA (Excelente)	96,48aA (Excelente)
160	34,40bB (Ruim)	93,00aA (Excelente)	92,89abA (Excelente)
240	25,53bB (Ruim)	92,29aA (Excelente)	81,82abA (Bom)
320	25,30bB (Ruim)	90,12aA (Excelente)	83,03abA (Bom)
400	24,82bB (Ruim)	84,01aA (Bom)	73,62bA (Razoável)
Desvio padrão (%)	35,87	6,66	20,68
Modelos de regressão simples			
Tipo de gotejador	Tipo de equação	R²	
G1	$\widehat{CUD} = 26,11 + 35,03^{**}(T + 0,50)^{-1}$ $0 \leq T \leq 400$	0,98	
G2	$\widehat{CUD} = \bar{CUD} = 91,00$	-	
G3	$\widehat{CUD} = \bar{CUD} = 87,57$	-	

Nota: ⁽¹⁾ Médias seguidas de pelo menos uma mesma letra minúscula nas colunas, para cada tempo de operação, e maiúscula nas linhas, para cada tipo de gotejador, não diferem entre si, a 10% de probabilidade, pelo teste de Tukey; ⁽²⁾ Merriam e Keller (1978); e ^{**} significativos a 1% de probabilidade, respectivamente, pelo teste t.

Nota-se que o menor valor de CUD, na unidade gotejadora com emissor G1, ocorre às 80 h e não no Tempo de Operação final (400 h) assim como em G2 e G3, devido a sua maior suscetibilidade ao entupimento. Houve 78% de redução no valor do CUD apenas com 80 h de operação, resultando em mudança na classificação proposta por Merriam e Keller (1978) que passou de excelente para ruim. A classificação ruim do CUD foi mantida até as 400 h, ou seja, durante 80% do Tempo de Operação dessa unidade gotejadora. O máximo valor de CUD classificado como excelente é obtido no Tempo de Operação inicial (0 h). Nota-se, também, na transição de 80 h para 160 h um aumento de 60% no valor do CUD, em função do processo de desobstrução aleatória.

Estes resultados corroboram com os de Mesquita et al. (2015) em unidades gotejadoras aplicando percolado de aterro sanitário por 160 h; onde os valores de CUD da unidade gotejadora dotada do emissor G1 não autocompensante de 1,65 L h⁻¹, idêntico ao do presente estudo, reduzem com Tempo de Operação, porém tendo a máxima redução do CUD não no Tempo de Operação final, e além

disso, houve o processo de desobstrução aleatória. No trabalho de Silva et al. (2014) verifica-se que a minimização do entupimento do emissor G1 e a obtenção de valores de CUD classificados como excelentes é obtida aumentando-se a pressão de serviço (≥ 140 kPa).

Diferentemente de G1, a maior redução de CUD na unidade gotejadora com emissor G2 (8%) acontece as 400h. Nessa o CUD foi classificado como excelente por Merriam e Keller (1978) em 80% do tempo de operação, recebendo nas últimas 80 h a classificação bom. Apesar da alteração na classificação do CUD, os níveis de obstrução foram baixos e não compromete a uniformidade de aplicação do efluente sanitário. A redução do CUD do presente estudo foi inferior aos 11% obtido por Batista et al. (2010) em sistema de irrigação por gotejamento, com emissor não autocompensante de 2,3 L h⁻¹, que aplicou água residuária sanitária tratada, durante 120 h.

A máxima redução de CUD da unidade gotejadora com emissor G3 (24%) ocorre às 400 h e de acordo com a classificação de Merriam e

Keller (1978), esse coeficiente foi classificado como excelente, bom e razoável, respectivamente, em 40, 40 e 20% do tempo de operação dessa unidade gotejadora. Estes resultados não corroboram com os apresentados por Mesquita et al. (2015) em seu estudo com unidade gotejadora dotada do mesmo emissor não autocompensante de $2,00 \text{ L h}^{-1}$ deste trabalho; onde a redução máxima no CUD foi de 4% especificamente no tempo de operação de 40 h e esse coeficiente foi classificado como excelente e bom, em 87,5 e 12,5% do tempo de operação.

Os valores de desvio padrão do CUD revelam a maior sensibilidade à obstrução do emissor G1, a menor de G2 e a intermediária de G3.

A análise de regressão revela que o modelo hiperbólico de primeiro grau foi o que melhor se ajustou aos dados de CUD e tempo de operação, da unidade gotejadora com emissor G1, sendo o coeficiente de determinação (R^2) de 0,98. Enquanto, para os dados de CUD em função do tempo de operação, das unidades gotejadoras G2 e G3, a média foi a melhor representação do processo.

Estes resultados diferem dos encontrados por Batista et al. (2013) em unidades gotejadoras operando com proporções de tempo de irrigação com efluente suíno e água de poço durante 160 h; onde modelos quadrático e a média foram os que melhor se ajustaram aos dados de CUD em função do tempo de operação e os valores de R^2 oscilaram de 0,79 a 0,99.

Na Figura 4 estão apresentadas imagens de partes dos emissores G1, G2 e G3 preenchidas com biofilme castanho esverdeado, após 400 h de operação com a água residuária sanitária tratada. O biofilme é um composto formado por secreções microbianas e partículas em suspensão presentes nas águas residuárias (Oliver et al., 2014); que se desenvolveu no interior dos gotejadores, acarretando mudanças no regime de escoamento e, conseqüentemente, favorecendo a deposição de partículas sobre ele; com o aumento da massa do biofilme no interior dos gotejadores, ocorreram ao longo do tempo entupimentos parcial e total dos mesmos, diminuindo os valores de CUC e CUD (Batista et al., 2010).



Figura 4. Imagens de partes dos emissores G1 (A), G2 (B) e G3 (C) com formação de biofilme, após 400 h de aplicação de água residuária sanitária tratada.

Conclusões

Em relação ao risco de obstrução de gotejadores inerente aos agentes físico-químicos e microbiológico da água residuária sanitária tratada, os valores médios de pH e sólidos dissolvidos totais representam risco severo; enquanto as médias de sólidos suspensos totais, ferro total, manganês total e magnésio e as médias de cálcio e coliformes totais receberam a classificação moderada e menor, respectivamente.

A análise temporal e o desvio padrão amostral dos coeficientes de uniformidade de Christiansen e de uniformidade de distribuição permitiram classificar a suscetibilidade ao entupimento por biofilme dos emissores em: $G1 > G3 > G2$.

O coeficiente de uniformidade de distribuição foi mais sensível na detecção do entupimento por biofilme em gotejadores, do que o coeficiente de uniformidade de Christiansen.

Houve alteração significativa dos coeficientes de uniformidade de Christiansen e de uniformidade de distribuição, ao longo do tempo de operação, apenas na unidade gotejadora com emissor G1.

Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, da Financiadora de Estudos e Projetos (FINEP) através do PROJETO BRAMAR e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

Referências

- Ait-Mouheb, N., Mange, A., Froment, G., Lequette, K., Bru-Adan, V., Maihol, J. C., ... & Wery, N. 2022. Effect of untreated or reclaimed wastewater drip-irrigation for lettuces and leeks on yield, soil and fecal indicators. *Resources, Environment and Sustainability*, 8, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.resenv.2022.100053>
- Baird, R. B., Eaton, A. D., & Rice, E. W. 2017. Standard methods for the examination of water and wastewater. 23.ed. Washington, DC: American public health association.
- Batista, R. O., Oliveira, A. D. F. M., & de Oliveira Mesquita, F. 2014. Desempenho hidráulico de sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária da suinocultura. *Magistra*, 26(1), 75-88.
- Batista, R. O., Oliveira, R. A., Santos, D. B. D., Oliveira, A. D. F., de Azevedo, C. A., & Medeiros, S. D. S. 2013. Obstrução e uniformidade de aplicação em sistemas de irrigação por gotejamento aplicando-se efluente da suinocultura. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 17, 698-705. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013000700002>
- Batista, R. O., Costa, F. G. B., Lopes, H. S. S., Coelho, D. D. C. L., & Paiva, M. R. D. F. C. 2011. Efeito das características do esgoto doméstico na uniformidade de aplicação de sistemas de irrigação por gotejamento. *Revista Caatinga*, 24(4), 137-144.
- Batista, R. O., Souza, J. A. R. D., & Ferreira, D. C. 2010. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. *Revista Ceres*, 57, 18-22. <https://doi.org/10.1590/S0034-737X2010000100004>
- Batista, R. O., Silva, K. B. D., Silva Júnior, M. J. D., Santos, D. B. D., & Cunha, R. R. D. 2018. Performance of drip emitters for different pressures and application of cashew nuts wastewater. *Dyna*, 85(204), 38-43. <https://doi.org/10.15446/dyna.v85n204.64322>
- Brasil. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento – SNIS. **Diagnóstico temático:** serviço de água e esgoto: visão geral: ano de referência 2021. Brasília: SNIS/MDR, 2022. 90p.
- Cavalcante, F. L., Bezerra, J. M., Queluz, J. G. T., Sánchez-Román, R. M., Dombroski, S. A. G., & Batista, R. O. 2021. Agrupamento de variáveis meteorológicas e qualitativas de água cinza em reator solar. *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente*, 14(4), 1-16. <https://doi.org/10.17765/2176-9168.2021v14n4e8073>
- Chandana, N., & Rao, B. 2021. Status of sustainable sanitation chain in rural, semi-urban, and urban regions: a case study of Maharashtra, India. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 11(1), 112-125. <https://doi.org/10.2166/washdev.2020.020>
- Capra, A., & Scicolone, B. 1998. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 70(4), 355-365. <https://doi.org/10.1006/jaer.1998.0287>
- Dhayal, D., Lal, K., Khanna, M., Sudhishri, S., Brar, A. S., Sindhu, V. K., ... & Chakraborty, D. (2023). Performance of surface and subsurface drip fertigated wheat-moongbean-maize cropping system under different irrigation schedules and nutrient doses. *Agricultural Water Management*, 284, 108338. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2023.108338>
- Duran-Ros, M., Puig-Bargués, J., Cufí, S., Solé-Torres, C., Arbat, G., Pujol, J., & de Cartagena, F. R. 2022. Effect of different filter media on emitter clogging using reclaimed effluents. *Agricultural Water Management*, 266, 107591. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107591>
- Ferreira, S. J. F., Pinel, S., Ríos-Villamizar, E. A., Miranda, S. Á. F., Pascoaloto, D., Vital, A. R. T., ... & da Cunha, H. B. 2021. Impact of rapid urbanization on stream water quality in the Brazilian Amazon. *Environmental Earth Sciences*, 80, 1-16.
- Fu, B., Li, Z., Gao, X., Wu, L., Lan, J., & Peng, W. 2021. Effects of subsurface drip irrigation on

- alfalfa (*Medicago sativa* L.) growth and soil microbial community structures in arid and semi-arid areas of northern China. *Applied Soil Ecology*, 159, 103859. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2020.103859>
- Furtado, A. P. F. V., Almeida Monte-Mor, R. C. de, & do Couto, E. D. A. 2021. Evaluation of reduction of external load of total phosphorus and total suspended solids for rehabilitation of urban lakes. *Journal of Environmental Management*, 296, 113339. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113339>
- Li, H., Li, P., Li, J., Jiang, Y., & Huang, X. 2023. Influence of micro/nano aeration on the diversity of the microbial community in drip irrigation to reduce emitter clogging. *Biosystems Engineering*, 235, 116-130. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.09.016>
- Lili, Z., Peiling, Y., Wengang, Z., Yunkai, L., Yu, L., & Chong, Z. 2021. Effects of water salinity on emitter clogging in surface drip irrigation systems. *Irrigation Science*, 39, 209-222. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00690-3>
- Liu, C., Wang, R., Wang, W., Hu, X., Wu, W., & Liu, F. 2022. Different irrigation pressure and filter on emitter clogging in drip phosphate fertigation systems. *Water*, 14(6), 853. <https://doi.org/10.3390/w14060853>
- Mainardis, M., Cecconet, D., Moretti, A., Callegari, A., Goi, D., Freguia, S., & Capodaglio, A. G. 2022. Wastewater fertigation in agriculture: Issues and opportunities for improved water management and circular economy. *Environmental Pollution*, 296, 118755. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.118755>
- Maroufpoor, E., Aminpour, Y., Kamangar, B. B., & Bargués, J. P. 2021. Clogging rate of pressure compensating emitters in irrigation with rainbow trout fish farm effluent. *Irrigation Science*, 39, 223-233. <https://doi.org/10.1007/s00271-020-00697-w>
- Merriam, J. L., & Keller, J. 1978. Farm irrigation system evaluation: a guide for management. *Farm irrigation system evaluation: a guide for management*.
- Mesquita, F. O., Silva, K. B., Batista, R. O., Dantas, T. B., & di Souza, L. 2015. Uniformidade de aplicação de percolado de aterro sanitário diluído em unidades de irrigação por gotejamento. *Agropecuária científica no semiárido*, 11(1), 145-156. <https://doi.org/10.30969/acsa.v11i1.590>
- Muhammad, T., Zhou, B., Liu, Z., Chen, X., & Li, Y. 2021. Effects of phosphorus-fertigation on emitter clogging in drip irrigation system with saline water. *Agricultural Water Management*, 243, 106392. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2020.106392>
- Nakayama, F. S., Boman, B. J., & Pitts, D. J. 2007. 11. Maintenance. In *Developments in Agricultural Engineering* (Vol. 13, pp. 389-430). Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0167-4137\(07\)80014-X](https://doi.org/10.1016/S0167-4137(07)80014-X)
- Oliver, M. M. H., Hewa, G. A., & Pezzaniti, D. 2014. Bio-fouling of subsurface type drip emitters applying reclaimed water under medium soil thermal variation. *Agricultural Water Management*, 133, 12-23. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2013.10.014>
- Paiva, L. A. L., Batista, R. O., Silva, R. R., Moniz, T. D. C., Augusto, F. I. S., Cunha, W. A., Rodrigues Filho, R. A., Melo, S. B., Costa, L. R., Medeiros, J. F., Portela, J. C., & Araújo, A. G. R., 2024. Canonical correlation between clogging agents and performance of drippers operating with aquaculture effluents. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 28(5), e274127. <http://dx.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v28n5e274127>
- Petit, J., García, S. M., Molle, B., Bendoula, R., & Ait-Mouheb, N. 2022. Methods for drip irrigation clogging detection, analysis and understanding: State of the art and perspectives. *Agricultural Water Management*, 272, 107873. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107873>
- Radini, S., González-Camejo, J., Andreola, C., Eusebi, A. L., & Fatone, F. 2023. Risk management and digitalisation to overcome barriers for safe reuse of urban wastewater for irrigation—a review based on European practice. *Journal of Water Process Engineering*, 53, 103690. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103690>
- Ramachandrala, V. R., & Kasa, R. R. 2022. Prevention and treatment of drip emitter clogging: a review of various innovative methods. *Water Practice & Technology*, 17(10), 2059-2070. <https://doi.org/10.2166/wpt.2022.115>
- Shen, Y., Puig-Bargués, J., Li, M., Xiao, Y., Li, Q., & Li, Y. 2022. Physical, chemical and biological emitter clogging behaviors in drip irrigation systems using high-sediment loaded water. *Agricultural Water Management*, 270,

107738.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2022.107738>
- Silva, K. B. D., Silva Júnior, M. J. D., Batista, R. O., Santos, D. B. D., Batista, R. O., & Lemos Filho, L. C. D. A. 2014. Irrigação por gotejamento com água residuária tratada da indústria da castanha de caju sob pressões de serviço. *Semina Ciências Agrárias*, 35(2), 695-706. <https://doi.org/10.5433/1679-0359.2014v35n2p695>
- Shi, K., Lu, T., Zheng, W., Zhang, X., & Zhangzhong, L. 2022. A review of the category, mechanism, and controlling methods of chemical clogging in drip irrigation system. *Agriculture*, 12(2), 202. <https://doi.org/10.3390/agriculture12020202>
- Solé-Torres, C., Lamm, F. R., Duran-Ros, M., Arbat, G., de Cartagena, F. R., & Puig-Bargués, J. 2021. Assessment of microirrigation field distribution uniformity procedures for pressure-compensating emitters under potential clogging conditions. *Transactions of the ASABE*, 64(3), 1063-1071. [@2021](https://doi.org/10.13031/trans.14486)
- Wang, T., Dai, X., Zhang, T., Xin, C., Guo, Z., & Wang, J. (2022). Formation and microbial composition of biofilms in drip irrigation system under three reclaimed water conditions. *Water*, 14(8), 1216. <https://doi.org/10.3390/w14081216>
- Wang, Y., Zhou, B., Zhang, J., Xu, F., & Li, Y. (2021). Effects of fertilizer types on biofilm growth in the drip irrigation system using the reclaimed water. *Irrigation Science*, 39(6), 725-734. <https://doi.org/10.1007/s00271-021-00738-y>
- Xiao, Y., Liu, Y., Ma, C., Muhammad, T., Zhou, B., Zhou, Y., ... & Li, Y. 2021. Using electromagnetic fields to inhibit biofouling and scaling in biogas slurry drip irrigation emitters. *Journal of Hazardous Materials*, 401, 123265. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123265>
- Zhang, J., Xiao, Y. S., Wu, Y., Jia, F., Li, S., Zhou, B., & Li, Y. 2022. Effects of microorganisms on clogging process and clogging substances accumulation of drip irrigation emitters using the high-sediment water sources. *Irrigation Science*, 40(6), 845-856. <https://doi.org/10.1007/s00271-022-00828-5>
- Zheng, M., Wutich, A., Brewis, A., & Kavouras, S. 2022. Health impacts of water and sanitation insecurity in the Global North: a scoping literature review for US colonias on the Mexico border. *Journal of Water and Health*, 20(9), 1329-1342. <https://doi.org/10.2166/wh.2022.085>