

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**

SISGO RACHITH ACUÑA CHINCHILLA

**PERFORMANCE DE EMISSORES EM IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO COM USO DE ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO**

RECIFE – PE

2016

SISGO RACHITH ACUÑA CHINCHILLA

PERFORMANCE DE EMISSORES EM IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO COM USO DE ESGOTO DOMÉSTICO TRATADO

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Engenharia
Agrícola da Universidade Federal
Rural de Pernambuco como
requisito parcial para a obtenção
do título de Mestre em Engenharia
Agrícola.

Orientador: Professor Dr.
Ênio Farias de França e Silva

RECIFE – PE

2016

Ficha catalográfica

A189p Acuña Chinchilla, Sisgo Rachith
Performance de emissores em irrigação por gotejamento com
uso de esgoto doméstico tratado / Sisgo Rachith Acuña Chinchilla. –
Recife, 2016.
107 f. : il.

Orientador: Ênio Farias de França e Silva.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade
Federal Rural de Pernambuco, Departamento de Engenharia
Agrícola, Recife, 2016.
Inclui referências e apêndice.

1. Reúso de água 2. Uniformidade 3. Entupimento de emissores
4. Controle estatístico da qualidade I. Silva, Ênio Farias de França e,
orientador II. Título

CDD 631

SISGO RACHITH ACUÑA CHINCHILLA
PERFORMANCE DE EMISSORES EM IRRIGAÇÃO POR
GOTEJAMENTO COM USO DE ESGOTO DOMÉSTICO
TRATADO

Defendida e aprovada em: 29 de fevereiro de 2016.

Orientador:

Prof. Ênio Farias de França e Silva, Dr.Sc.
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
(UFRPE)

Examinadores:

Prof. João Audifax César de Albuquerque Filho, Dr.Sc.
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
(UFRPE)

Prof. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida, Dra.Sc.
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
(UFRPE)

Alexsandro Oliveira da Silva, Dr.Sc.
UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP)

Dedico

*À minha mãe **Alba Iris Chinchilla**
Mora.*

*À minha namorada **Juliana**
Aparecida Silveira Pereira.*

*Às minhas irmãs **Silvia e Gina,**
meus irmãos **Bryam, Carlos, Joe e**
Yeiko.*

Ofereço com carinho

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo presente da vida, a saúde e a força para conquistar mais um sonho.

À Organização dos Estados Americanos e o Grupo COIMBRA de universidades brasileiras pela oportunidade de fazer estudos de pós-graduação no Brasil.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pela oportunidade de realizar este curso.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao professor Dr. Ênio Farias de França e Silva, pelo apoio, orientação, conhecimentos, amizade, atenção e disposição para ajudar.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola pelos conhecimentos transmitidos, em especial ao professor Manassés Mesquita da Silva pela amizade e as horas de conversa sobre hidráulica e projetos de irrigação.

À banca examinadora, Prof. Dr. João Audifax César de Albuquerque Filho, Prof. Dra. Ceres Duarte Guedes Cabral de Almeida e Dr. Aleksandro Oliveira da Silva, pelas contribuições no presente trabalho.

A Manuel Cunegundes Capano pela grande ajuda em todos os processos administrativos.

À Estação de Agricultura Irrigada de Ibimirim, (EAI - UFRPE) e seu coordenador José Mário Santana que possibilitou minha estadia durante o desenvolvimento da pesquisa.

À minha mãe Alba Iris Chinchilla Mora pelo esforço ao longo de tantos anos para me ajudar a atingir meus objetivos e ao meu pai Juan Carlos Acuña Fernández, que sempre me motivou a estudar.

À minha namorada Juliana Aparecida Silveira Pereira que mesmo distante sempre me apoiou, me ajudou e acreditou em mim mais do que eu mesmo.

A Patrício dos Santos e sua família, sem cuja ajuda essa pesquisa não teria sido possível.

Aos amigos conquistados durante o Curso de Pós-Graduação da UFRPE, em especial a Renato Augusto Rodrigues (meu irmão paraense com quem estarei sempre agradecido), Fábio Ferreira, John Lennon da Silva, Hozana Francilino, Daniel Dantas, Douglas Silva e Gerbson Pinheiro pelos momentos de estudo e principalmente a amizade cultivada.

SUMÁRIO

RESUMO	i
ABSTRACT	iii
RESUMEN	v
1 INTRODUÇÃO GERAL	vii
2 HIPÓTESES	ix
3 OBJETIVOS	x
3.1 Objetivo Geral	x
3.2 Objetivos específicos.....	x
4 CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA	1
4.1 Uso da água na agricultura.....	2
4.2 Características do esgoto doméstico	3
4.3 Tratamento de esgoto doméstico	7
4.4 Digestão anaeróbia	8
4.4.1 Reator Anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodos.....	9
4.4.2 Filtro anaeróbio	10
4.4.3 Decanto digestor	11
4.5 Utilização de águas residuárias tratadas na agricultura	11
4.6 Irrigação por gotejamento	13
4.6.1 Hidráulica dos emissores.....	14
4.6.2 Entupimento dos emissores	16
4.7 Controle estatístico da qualidade	20
CAPÍTULO 2: PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTES DE ESGOTO TRATADO	29
RESUMO	30

ABSTRACT	31
INTRODUÇÃO	32
MATERIAL E MÉTODOS	34
Localização da área experimental.....	34
Delineamento experimental	34
Dimensionamento do sistema e condições de operação	36
Testes de uniformidade realizados e variáveis avaliadas.....	39
Amostragem e caracterização da água e dos efluentes	42
RESULTADOS E DISCUSSÃO	43
Coefficiente de variação do fabricante	43
Coefficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)	44
Coefficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)	48
Vazão média	52
Entupimento relativo dos emissores	54
Coefficiente de Variação da vazão (CVq).....	55
CONCLUSÕES	58
REFERÊNCIAS	59
CAPÍTULO 3: CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO	62
RESUMO	63
ABSTRACT	64
INTRODUÇÃO	65
MATERIAL E MÉTODOS	67
RESULTADOS E DISCUSSÃO	72
CONCLUSÕES	79
REFERÊNCIAS	80

CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	82
APÊNDICE A. Emissores utilizados	83
APÊNDICE B. Área experimental.....	84

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 1. Qualidade microbiológica recomendada para o uso de água residuária na agricultura	5
Tabela 2. Valores médios dos parâmetros para o efluente de três sistemas de tratamento de esgoto doméstico, Ibimirim – PE	6
Tabela 3. Expoentes de pressão de diferentes emissores	15
Tabela 4. Classificação para o Coeficiente de Variação do fabricante (CV_f)	16
Tabela 5. Fatores potenciais de entupimento de gotejadores	18
Tabela 6. Classificação de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de uniformidade estatístico (CUE)	18
Tabela 7. Valores mínimos recomendados para a razão de capacidade de processo	23

CAPÍTULO 2: PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTES DE ESGOTO TRATADO

Tabela 1. Especificações geométricas e hidráulicas dos gotejadores utilizados no experimento	36
Tabela 2. Parâmetros físico-químicos dos tipos de água usados no experimento	43
Tabela 3. Valores de vazão e coeficientes obtidos na etapa inicial do experimento .	43
Tabela 4. Resumo da análise de variância para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) dos emissores utilizando diferentes tipos de água nos três testes realizados	46
Tabela 5. Teste médias do CUD para o tratamento tipo de emissor no teste realizado com 0,5 horas de operação do sistema	47
Tabela 6. Teste de médias do CUD para os tratamentos tipo de emissor e tipo de água no teste realizado com sete horas de operação do sistema	47
Tabela 7. Teste de médias para o CUD da interação dos emissores com os tipos de água no teste realizado com 55 horas de operação do sistema	48

Tabela 8. Resumo da análise de variância para o Coeficiente de Uniformidade Estatística (CUE) dos emissores utilizando diferentes tipos de água nos três testes realizados 50

Tabela 9. Teste médias do CUD para o tratamento tipo de emissor no teste realizado com 0,5 horas de operação do sistema..... 50

Tabela 10. Teste de médias do CUE para os tratamentos tipo de emissor e tipo de água no teste realizado com 7 horas de operação do sistema..... 51

Tabela 11. Teste de médias para o CUE da interação dos emissores com os tipos de água no teste realizado com 55 horas de operação do sistema. 51

CAPÍTULO 3: CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

Tabela 1. Fatores para construir gráficos de controle \bar{X} 71

Tabela 2. Valores mínimos recomendados para razão de capacidade de processo ... 71

Tabela 3. Razão de capacidade de processo calculados para irrigação em campo e porcentagem da amplitude da amostra requerida para atender as especificações 76

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

Figura 1. Estrutura de um reator UASB. 9

CAPÍTULO 2: AVALIAÇÃO DA PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTES DE ESGOTO TRATADO

Figura 1. Configuração das instalações de coleta, tratamento de esgoto doméstico da Estação e croqui da área experimental. 35

Figura 2. Disposição aleatória dos diferentes tipos de emissores dentro das parcelas. 37

Figura 3. Disposição das linhas derivadas e laterais num dos blocos do experimento. 39

Figura 4. Sistema de trincheiras, tábuas e recipientes coletores numerados para a obtenção da água aplicada por cada gotejador. 40

Figura 5. Valores de CUD para os diferentes gotejadores (A,B,C,D) utilizando efluente de UASB (a), Filtro digestor em associação com decanto digestor (b), Filtro digestor (c) e água de abastecimento (d). 45

Figura 6. Valores de CUE para os gotejadores (A,B,C,D) usados no experimento funcionando com efluentes de UASB (a), Filtro digestor em associação com decanto digestor (b), Filtro digestor (c) e água de abastecimento (d). 49

Figura 7. Variação da vazão média dos gotejadores A (a), B (b), C (c) e D (d) para cada um dos tipos de água utilizada e tempo de operação. 52

Figura 8. Distribuição dos diferentes graus de entupimento para as combinações de efluentes e gotejadores após 55 horas de experimento. 54

Figura 9. Dinâmica do Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo A. 55

Figura 10. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo B calculado nos testes realizados. 55

Figura 11. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo C calculado nos testes realizados 56

Figura 12. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo D calculado nos testes realizados. 56

CAPÍTULO 3: CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO E MANEJO DOS SISTEMAS DE IRRIGAÇÃO

Figura 1. Esquema do processo de irrigação localizada utilizado no experimento. ... 69

Figura 2. Gráfico de tolerância da vazão média do gotejador tipo A para as amostras obtidas no teste preliminar. 72

Figura 3. Gráfico de tolerância da vazão média do gotejador tipo B para as amostras obtidas no teste preliminar. 73

Figura 4. Gráfico de tolerância da vazão média do gotejador tipo C para as amostras obtidas no teste preliminar. 74

Figura 5. Gráfico de tolerância da vazão média do gotejador tipo D para as amostras obtidas no teste preliminar. 74

Figura 6. Gráfico de controle de controle \bar{X} para a vazão dos gotejadores A (a), B (b), C (c) e D (d) e valor das amostras preliminares realizadas antes do experimento. ... 75

Figura 7. Gráfico de controle \bar{X} para a vazão dos gotejadores A B C e D com uso de água ao final do experimento (55 horas de funcionamento). 77

Figura 8. Controle estatístico da irrigação utilizando efluente doméstico tratado com filtro digestor num gotejador interno não autocompensante. 78

Figura 9. Controle estatístico do processo de irrigação após 55 horas utilizando três efluentes domésticos tratados e água, num gotejador externo autocompensante de saída lateral. 78

APÊNDICE A. Características dos emissores utilizados

Figura 1. Gotejadores internos utilizados no experimento. A: autocompensante, B: não autocompensante. 83

Figura 2. Gotejadores externos utilizados no experimento. A: com saída superior, B: com saída lateral. 83

APÊNDICE B. Área experimental

Figura 1. Vista geral da área experimental durante a execução do projeto. 84

RESUMO

Como resultado da redução da disponibilidade do recurso hídrico em qualidade e quantidade apropriada para seus diversos usos, a utilização de água residuária tratada é atualmente uma necessidade mais do que uma alternativa, principalmente em aquelas regiões que apresentam escassez. Os sistemas de irrigação por gotejamento são uma forma eficiente e confiável para utilizar efluentes domésticos tratados na agricultura. Porém, algumas características da água residuária podem comprometer o desempenho dos emissores e a uniformidade do sistema. Objetivou-se com este trabalho avaliar o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento sob condições de campo utilizando efluentes de esgoto doméstico obtido através de diferentes métodos de tratamento: reator UASB, filtro digestor anaeróbio associado a um decanto digestor e filtro digestor anaeróbio, em comparação com o uso de água de abastecimento. Foram avaliados quatro tipos de gotejadores, dois internos tipo labirinto e dois externos, sendo um dos emissores internos não autocompensante. Determinou-se a condição inicial dos emissores antes do experimento. Posteriormente foram realizadas três coletas da vazão de 16 gotejadores em cada linha lateral para determinar as variações nos coeficientes de desempenho do sistema às 0,5; 7 e 55 horas de funcionamento. Para a avaliação da resposta da vazão média dos gotejadores aos tratamentos, foram utilizadas ferramentas do controle estatístico da qualidade e do processo. A irrigação com efluente doméstico tratado provocou o aumento no Coeficiente de Variação da vazão (CVq) e diminuição dos Coeficientes de Uniformidade e Estatístico (CUD e CUE). As características físicas e químicas dos efluentes foram identificadas como as causas principais do entupimento. No final do experimento apresentou-se interação entre os tipos de água e modelo do emissor, sendo a combinação menos favorável o gotejador externo de saída lateral dupla usando todos os tipos de efluente tratado. Nesse caso apresentou-se entupimento de uma alta porcentagem de emissores. Não houve diferença no desempenho do sistema funcionando com o gotejador não autocompensante em comparação com o gotejador interno autocompensante e o gotejador externo autocompensante de saída superior. A condição inicial dos emissores foi classificada como excelente de acordo com o Coeficiente de Variação do fabricante (CVf). Mesmo apresentando esta característica, nenhum dos modelos conseguiu atingir a especificação de vazão nominal em condições de campo. Os

gotejadores externos apresentaram maior dispersão entre as medidas de vazão o gotejador interno a menor variabilidade. O processo de irrigação com o gotejador externo de saída superior esteve sob controle durante todo o experimento utilizando água de abastecimento. Para o uso de efluentes de esgoto doméstico tratado recomenda-se a primeira avaliação após 7 horas de trabalho e medidas apropriadas para corrigir problemas de entupimento.

Palavras chave: reúso de água, uniformidade, entupimento de emissores, controle estatístico da qualidade.

ABSTRACT

Because of availability reduction of water resources in quantity and quality to attend its diverse uses, usage of treated wastewater is nowadays more a need than an alternative, especially in regions having scarcity. Drip irrigations systems are an efficient and reliable way to use sewage effluent in agriculture. However, some characteristics of wastewater could reduce performance of emitters and system uniformity. The aim of this study was to assess a drip irrigation system under field conditions using treated sewage effluents obtained from three different treatment methods: UASB reactor, anaerobic filter associated with a septic tank, anaerobic filter and fresh water as control treatment. Four kinds of emitters were evaluated. Two was inline labyrinth type and two online, where one of inline drippers was non-pressure compensating. Initial condition of drippers was defined before the start of experiment. Subsequently, three discharge measurements of 16 emitters in each lateral were performed through the execution of experiment at 0,5; 7 and 55 working hours. To assess the response of average discharge of emitters to treatments it were used statistical quality control and process tools. Irrigation with treated sewage effluent promoted increasing of mean discharge ratio coefficient (D_{ra}) and diminishing emission uniformity (EU) and statistical uniformity coefficient (U_s). Physic and chemical characteristics of effluents was identified as main causes of clogging. At the end of experiment, there was interaction between kind of water and type of emitter, where the least favorable combination was online lateral outlet dripper using any kind of treated effluent. In this circumstance, there was high percentage of emitter clogging. There was no difference in performance of system using inline non-pressure compensating emitters instead of using inline self-compensating and online pressure compensating emitter with upper outlet. Initial condition of drippers was classified as excellent according to manufacturing coefficient of variability (Mfg CV) values. Even with this characteristic, none of the emitters of the drippers reaches the manufacturer's specification for average flow in field conditions. Online emitters showed more dispersion for individual flow measurements and non-pressure compensating dripper showed less variability. Irrigation process using online upper outlet was under statistical control through all experiment when using fresh water. When using treated wastewater effluents for irrigation it is recommended a first system assessment after 7

operation hours with the application of control and appropriated correcting procedures to diminish clogging issues.

Keywords: water reuse, uniformity, emitter clogging, statistical quality control.

RESUMEN

Como resultado de la reducción en la disponibilidad del recurso hídrico en calidad y cantidad adecuada para sus diversos usos, la utilización de aguas residuales tratadas es actualmente una necesidad más que una alternativa, principalmente en aquellas regiones que presentan escasez. Los sistemas de riego por goteo son una manera eficiente y confiable para utilizar efluentes domésticos tratados en la agricultura. Sin embargo, algunas características del agua residual pueden comprometer el desempeño de los emisores y la uniformidad del sistema. Este trabajo tuvo como objetivo evaluar el desempeño de un sistema de riego por goteo bajo condiciones de campo utilizando efluentes de aguas negras obtenidas a través de diferentes métodos de tratamiento: reactor UASB, filtro digestor anaerobio asociado a un tanque séptico e filtro digestor anaerobio, comparados con el uso de agua potable. Se evaluaron cuatro tipos de goteros, dos internos de labirinto e dos externos, siendo uno de los emisores internos no autocompensado. Se determinó la condición inicial de los emisores antes del experimento y posteriormente se realizaron tres medidas del caudal de 16 goteros en cada línea lateral para determinar las variaciones en los coeficientes de desempeño del sistema. Para la valoración de la respuesta del caudal promedio de los goteros a los tratamientos, fueron utilizadas herramientas de control estadístico de la calidad y los procesos. El riego con efluentes de aguas negras tratadas provocó un aumento en el Coeficiente de Variación de descarga (CVq) y disminución de los Coeficientes de Uniformidad de Distribución y Estadístico (CUD e CUE). Las características físicas y químicas de los efluentes fueron identificadas como las principales causas de obstrucción. Al final de experimento hubo interacción entre los tipos de agua y el modelo del emisor, siendo la combinación menos favorable la del gotero externo de salida lateral doble usando todos los tipos de efluente tratado. En este caso se observó la obstrucción de un alto porcentaje de los emisores. No hubo diferencia en cuanto al desempeño del sistema funcionando con el gotero no auto compensado en comparación con el gotero integral auto compensado y el emisor externo auto compensado de salida superior. La condición inicial de los emisores fue clasificada como excelente de acuerdo con los valores del Coeficiente de Variación del fabricante (CVf). Aun presentando esta característica, ningún de los modelos consiguió alcanzar la especificación de caudal nominal en condiciones de campo. Los goteros externos

presentaron mayor dispersión entre las medidas de caudal individuales y el emisor interno presentó la menor variabilidad. El proceso del riego utilizando gotero externo de salida superior estuvo bajo control estadístico durante todo el experimento funcionando con agua potable. Para el uso de efluentes de aguas negras tratadas se recomienda la primera evaluación del sistema después de 7 horas de trabajo y medidas de correctivas apropiadas para evitar problemas de obstrucción.

Palabras clave: reutilización de agua, uniformidad, obstrucción de emisores, control estadístico de la calidad.

1 INTRODUÇÃO GERAL

A água é um recurso fundamental para todos os processos biológicos e as atividades humanas, porém apresenta uma grande variabilidade na sua distribuição espacial e temporal. Em muitos países e regiões o recurso hídrico encontra-se limitado em certas épocas ou é escassa durante todo o ano, com o agravante que nem sempre a água disponível possui a qualidade adequada para os diversos usos.

A agricultura é responsável pelo consumo de aproximadamente 70% da água (FAO, 2003) e em alguns casos essa situação cria conflitos entre os diferentes grupos de usuários, pelo fato dessa grande quantidade não poder ser usada para fins mais nobres e em outros casos por não estar sendo utilizada de forma eficiente.

No semiárido da região nordeste do Brasil existem condições hidrológicas, climáticas e geológicas que ocasionam um balanço hídrico desfavorável, afetando negativamente a disponibilidade dos recursos hídricos superficiais e limitando a quantidade e qualidade dos subterrâneos (DANTAS, 2012). Sob essas condições os sistemas de agricultura irrigada, além de serem em muitos casos os únicos que podem ser desenvolvidos com sucesso, favorecem o incremento da produção por unidade de área.

Os sistemas de irrigação e fertirrigação por gotejamento, quando planejados e operados apropriadamente, possuem maior eficiência na utilização da água, portanto é necessário investir na pesquisa visando a melhora e maior adaptabilidade desses sistemas na agricultura.

A possibilidade de abastecer total ou parcialmente os requerimentos hídricos e nutricionais da produção agrícola familiar com efluentes do tratamento de esgoto doméstico é uma alternativa pela qual podem ser reduzidos custos de produção, diminuir a pressão sobre as fontes de água superficiais e subterrâneas e demonstrar que a reutilização da água residuária é uma opção viável para um melhor manejo da agricultura, visando garantir sua sustentabilidade ambiental.

Segundo Keller & Bliesner (1990), a irrigação por gotejamento funciona como um sistema de alta frequência de aplicação que apresenta várias vantagens como não favorecer o crescimento de ervas daninhas, permitir a inserção de fertilizantes na água de irrigação e usar uma quantidade menor de água mantendo um nível de umidade perto da capacidade de campo do solo.

Apesar do exposto, nos sistemas de irrigação por gotejamento é necessário que a água utilizada tenha um mínimo de qualidade para evitar obstruções nos emissores, uma vez que o entupimento dos gotejadores constitui o maior problema dessa técnica de irrigação (GOMES, 1994).

Tendo conhecimento das características hidráulicas dos diferentes emissores disponíveis para os sistemas de irrigação por gotejamento, o problema consiste no fato de que as propriedades físico-químicas do recurso líquido para ser usado nesse método de irrigação a exemplo da utilização com êxito de efluentes do tratamento de águas residuárias ainda não têm sido identificadas com precisão.

Existem estudos feitos na região que identificaram o tipo de efluente de tratamento de esgoto que teve menor prejuízo no desempenho de gotejadores externos autocompensantes (SILVA et al., 2012), porém, não foram determinadas nem avaliadas propriedades físicas como densidade e viscosidade. Além disso, as propriedades físico-químicas das águas residuárias apresentam variabilidade espacial e, em menor medida, temporal motivo pelo qual resulta muito importante a caracterização física, química e microbiológica dos efluentes do tratamento para identificar as causas do entupimento quando se utiliza água residuária tratada.

No sertão do Nordeste brasileiro existem poucas pesquisas desenvolvidas em campo orientadas à determinação do tipo de emissor mais adequado para trabalhar nas condições climáticas presentes utilizando recursos hídricos de qualidade inferior.

Diante do exposto objetivou-se nessa pesquisa avaliar mediante diferentes procedimentos o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento montado no campo na região semiárida do estado de Pernambuco, trabalhando com diferentes efluentes de esgoto tratado e utilizando como referência a cultura do algodão, verificando também a adaptabilidade de diferentes emissores para trabalhar com água de qualidade inferior com a intenção de ajudar na viabilização do reúso da água para agricultura nessa região.

2 HIPÓTESES

2.1. O desempenho hidráulico dos gotejadores diminui com o tempo de uso, apresentando diferenças em função da qualidade da água residuária tratada;

2.2. Um dos efluentes apresenta melhores propriedades físico-químicas que propiciam sua utilização de forma viável nos sistemas de fertirrigação por gotejamento.

2.3. A arquitetura de alguns emissores viabiliza seu uso com efluente de esgoto doméstico tratado com menor prejuízo no seu desempenho.

3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo Geral

Avaliar o desempenho hidráulico de um sistema de irrigação por gotejamento que utiliza efluente de três sistemas diferentes de tratamento de esgoto doméstico, para encontrar o método de tratamento e o tipo de emissor que permitam a maior adaptabilidade ao uso de águas residuárias domésticas no sertão pernambucano.

3.2 Objetivos específicos

- 1) Avaliar o desempenho hidráulico de quatro tipos de emissores dentro de um sistema de irrigação por gotejamento instalado em campo, utilizando três tipos de efluente de esgoto doméstico tratado e água;
- 2) Analisar estatisticamente o funcionamento geral do sistema e avaliar as possíveis variações no processo da irrigação;
- 3) Definir o tratamento de efluente doméstico mais adequado afim de causar a menor interferência na performance da irrigação por gotejamento;
- 4) Identificar o tipo de emissor mais adequado para uso na região de acordo com seu desempenho ao longo do tempo sob uso de esgoto tratado;
- 5) Identificar as propriedades das águas residuárias que influenciam com maior intensidade o desempenho dos emissores.

4 CAPÍTULO 1: REVISÃO DE LITERATURA

4.1 Uso da água na agricultura

Atualmente, a agricultura destaca-se como a atividade antrópica que consome a maior parte da água utilizada no mundo. Água, agricultura e ambiente estão intrinsecamente associados através do percurso da água no balanço hídrico, dos componentes da água no solo, do balanço de energia e das conexões entre água, terra e produtividade (CIGR, 2013).

A UNESCO (2003) considera que dentre os maiores desafios da humanidade relacionados com água estão: satisfazer as necessidades humanas básicas, proteger os ecossistemas para o bem-estar da população e do planeta, garantir o abastecimento de alimentos para uma quantidade mundial de pessoas em aumento e administrar o recurso hídrico de uma forma responsável para garantir um desenvolvimento sustentável.

Nos próximos anos, a relação entre água e agricultura se tornará ainda mais estreita e complexa, devido a múltiplos fatores como o crescimento da população, a tendência ao incremento no tamanho das cidades, mudanças no comportamento das sociedades rurais, aumento da temperatura do planeta e diminuição da disponibilidade da água por causa do aquecimento global e a redução da área dedicada para as atividades agrícolas em favor da expansão da área utilizada para atividades urbanas (CIGR, 2013).

A alimentação humana e animal tem sua origem nas atividades agropecuárias e as expectativas ao nível mundial indicam uma propensão ao aumento contínuo na produção de alimentos o que trará consigo um aumento na área agrícola ou um aumento na eficiência da produção e ampliação na demanda da água para uso na agricultura ou um acréscimo na eficiência agrícola do uso do recurso hídrico (BRITO & ANDRADE, 2010).

De acordo com a FAO (2003), no futuro a agricultura deverá responder às mudanças nos modelos de demanda de alimentos e combater a insegurança alimentar. Desta forma, terá que competir pela pouca água disponível com os outros usos e diminuir a pressão ao ambiente. Isto implica a necessidade da melhoria da produtividade da água usada nos processos agrícolas tanto ao nível de pesquisa e desenvolvimento de sistemas mais eficientes quanto melhora no transporte,

armazenamento e uso do recurso. Apesar das preocupações sobre a ineficiência técnica do uso da água, sua produtividade aumentou pelo menos 100% entre 1961 e 2001 e o principal fator responsável foi o incremento da produção. Em muitas culturas o rendimento melhorou utilizando a mesma quantidade de água ou até quantidades menores. Como esta atividade é a maior usuária dos recursos hídricos, pode-se afirmar que o investimento no uso eficiente da água na agricultura é o melhor método para disponibilizar água para outros fins.

Os princípios básicos para melhorar a produtividade da água no campo incluem reduzir todas as perdas e incrementar o uso efetivo da água da chuva, da água armazenada e da água de qualidade inferior. Uma das técnicas recomendadas é a utilização de irrigação por gotejamento (FAO, 2003).

A dificuldade para obter água é maior nas regiões áridas e semiáridas do planeta, onde o clima é desfavorável para o desenvolvimento adequado da agricultura (BONET & RICARDO, 2011). O problema aumenta nas estações secas e quentes do ano, onde é preciso fornecer uma quantidade maior de água para garantir um ótimo desenvolvimento de algumas culturas específicas, situação que traz como consequência que a agricultura se constitua como uma das maiores pressões ao ambiente, em termos de uso do recurso hídrico (BELLINI, et al., 2010).

A reutilização da água constitui uma alternativa muito importante para diminuir os problemas de escassez hídrica e reduzir a utilização de água potável (SCHOLZE, 2011). O reúso sustentável precisa de guias técnicos para garantir a saúde pública e a proteção ambiental, mas também a sustentabilidade econômica é fundamental para o sucesso dos projetos de reciclagem como estratégia para a conservação dos recursos hídricos (ALVES et al., 2011).

4.2 Características do esgoto doméstico

As águas residuárias tratadas contêm teores residuais de compostos químicos, bem como numerosos micro-organismos, sendo alguns patogênicos, em concentração variável. Estes componentes em alguns casos representam um benefício para certas atividades como por exemplo a fertilização do solo proporcionada pela reutilização de

águas residuais para irrigação, devido ao conteúdo de nitrogênio e fósforo. (DO MONTE & ALBUQUERQUE, 2010).

O esgoto doméstico ou municipal está composto principalmente por água que apresenta teores relativamente baixos de sólidos diluídos e suspensos, carboidratos, lignina, gorduras, sabões e detergentes sintéticos e diversos componentes orgânicos e inorgânicos. Dentre estas substâncias químicas podem ser encontradas elementos tóxicos como cobre, cádmio, arsênio, cromo, chumbo, mercúrio, entre outros. Por outro lado, uma das considerações mais importantes no uso do esgoto para a agricultura tem a ver com a presença de organismos patogênicos (PESCOD, 1992).

Nas águas residuárias domésticas tratadas a concentração de poluentes é consideravelmente menor do que no esgoto bruto, dependendo do nível de tratamento e da eficiência do processo. Por exemplo o tratamento secundário proporciona um efluente apto para sua utilização em determinadas aplicações sempre que compatíveis com o alto teor de microrganismos e a presença de algumas substâncias químicas remanentes. Por outro lado, certas atividades requerem níveis muito menores de organismos patogênicos e compostos químicos nocivos para a saúde humana e animal (DO MONTE & ALBUQUERQUE, 2010). Sobre este ponto a World Health Organization (WHO) estabeleceu um guia para o uso de águas residuárias, o qual se detalha na Tabela 1.

Em vários países foram conduzidos estudos e testes de laboratório, para caracterizar os parâmetros físico-químicos do esgoto ou efluente de esgoto tratado utilizado. Num experimento desenvolvido na Nigéria com esgoto municipal, Sarkinnoma et al. (2013) encontraram valores dentro dos recomendados pela Food and Agriculture Organization (FAO) e WHO com exceção da condutividade elétrica, dureza e teor de nitrogênio e nitratos em esgoto urbano usado para irrigação. No Brasil, Reinaldo et al. (2012) avaliaram a qualidade do efluente de esgoto doméstico obtido por um sistema de tratamento com decanto digestor com filtro biológico associado a um sistema alagado construído e reator solar. Concluíram que com um tempo de retenção de 12 horas atingiu – se a remoção de 99,99% dos coliformes termotolerantes e obteve – se um efluente apropriado para reuso agrícola segundo as diretrizes brasileiras.

Tabela 1. Qualidade microbiológica recomendada para o uso de água residuária na agricultura

Categoria	Condições de reúso	Nematóides intestinais (ovos L⁻¹)	Coliformes fecais (Unid L⁻¹)	Tratamento recomendado
A	Irrigação de produtos que são ingeridos crus, campos esportivos e parques.	≤ 1	≤ 1000	Lagoas de estabilização em série ou tratamento equivalente.
B	Irrigação de cereais, cultivos industriais, forrageiras, pastagens e árvores.	≤ 1	Sem padrão recomendado	Retenção em lagoa de estabilização por 8 – 10 dias.
C	Irrigação localizada de culturas da categoria B se não existir exposição dos trabalhadores ou público em geral.	N/A	N/A	Tratamento requerido para sistema de irrigação, mas não menos que sedimentação primária.

Fonte: World Health Organization (1989).

A qualidade e as características da água residuária tratada vão depender da técnica e nível do tratamento. No Município de Ibimirim – PE, Zaidan et al. (2011) conduziram um estudo com o objetivo de caracterizar e avaliar a qualidade dos efluentes do tratamento do esgoto doméstico. Os principais resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros para o efluente de três sistemas de tratamento de esgoto doméstico, Ibimirim – PE

Parâmetro	Unidades	UASB	Digestor + Filtro anaeróbio	Filtro anaeróbio
DQO	mg de O ₂ L ⁻¹	395,48	384,58	694,88
DBO	mg de O ₂ L ⁻¹	36,05	47,30	65,03
SST	mg L ⁻¹	61,63	44,30	114,60
CE	dS cm ⁻¹	2137,70	1984,73	1884,25
pH	-	7,14	7,34	7,10
SDT	mg L ⁻¹	776,70	744,15	916,68
S Sed	mg L ⁻¹	0,40	1,08	4,33
Dureza Total	mg de CaCO ₃ L ⁻¹	221,63	196,25	222,85
N Total Kjeldahl	mg L ⁻¹	106,90	74,33	84,30
Sulfatos	mg L ⁻¹	19,88	89,68	67,70
P	mg L ⁻¹	10,25	8,68	9,39
Sódio	mg de Na L ⁻¹	99,10	116,58	111,65
Potássio	mg de K L ⁻¹	43,58	42,43	53,63

DQO: demanda bioquímica de oxigênio, DQO: demanda química de oxigênio, SST: sólidos suspensos totais, CE: condutividade elétrica, pH: potencial de hidrogênio, SDT: sólidos dissolvidos totais.

Fonte: Zaidan et al. (2011).

Neste estudo os autores encontraram eficiências de remoção da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) entre 65,75 e 93,6% para o digestor acompanhado do filtro, 45,3% até 94,8% para o reator anaeróbio de fluxo ascendente (UASB, Upflow Anaerobic Sludge Blanket Reactor) e de 40,3% até 91,9% para o filtro anaeróbio. No caso da redução da DQO o digestor seguido de filtro teve uma eficiência de 51,7% até 98,2%, o reator UASB de 77,2% até 92,3% e no filtro de 61,52% até 84,3%.

Concluiu-se no trabalho que a presença de macro e micronutrientes nos esgotos tratados podem ser considerados benéficos para o bom desempenho da agricultura irrigada sendo uma alternativa viável de fertirrigação.

4.3 Tratamento de esgoto doméstico

Dentre os resíduos líquidos resultantes das atividades humanas está o esgoto doméstico, sendo que este tipo de dejetos não é tratado na sua totalidade. Uma fração vai para as estações de tratamento onde ocorre uma redução no teor de sólidos suspensos produzindo dois tipos de subprodutos: o lodo e a água residuária ou efluente (CARARO, 2004). A parte restante do esgoto doméstico é vertida sem tratamento nos corpos de água superficial.

O tratamento do esgoto é um processo que é desenvolvido em várias etapas. Dependendo da qualidade desejada para o efluente do tratamento, pode incluir maior ou menor número de fases. O processo pode ser dividido em: tratamento preliminar, tratamento primário, tratamento secundário e tratamento terciário ou avançado. O tratamento preliminar consiste em gradeamento e sedimentação, pois o seu objetivo é remover as partículas sólidas mais grosseiras como areia e outros objetos presentes na água. Este processo é necessário para melhorar a eficiência da operação nas etapas seguintes (PESCOD, 1992).

O objetivo do tratamento primário é a remoção de sólidos sedimentáveis orgânicos e inorgânicos por sedimentação, redução da concentração de sólidos suspensos não sedimentáveis e a eliminação de materiais flutuantes como matéria orgânica suspensa (TORRES, 2012). De acordo com Pescod (1992) estes processos podem ser realizados em tanques decantadores, também chamados de clarificadores ou em estações de tratamento de grandes dimensões, em tanques onde ocorre a digestão na qual bactérias anaeróbias e facultativas metabolizam o material orgânico e produzem lodo.

No tratamento secundário objetiva-se melhorar a qualidade do efluente do tratamento primário removendo as substâncias orgânicas e sólidos suspensos remanentes além da redução parcial de nutrientes e agentes patogênicos. Na maioria dos casos consiste no uso de processos biológicos e químicos para eliminar matéria orgânica biodegradável que está dissolvida no efluente (TORRES, 2012). Entre os sistemas de tratamento secundário estão os lodos ativados, filtros percoladores, reator de membranas, filtros biológicos e leitos de macrófitas (DO MONTE & ALBUQUERQUE, 2010)

Finalmente, os tratamentos terciário e avançado correspondem a processos específicos para a remoção de componentes do esgoto que não podem ser removidos nos procedimentos prévios (nitrogênio, fósforo e metais pesados), remoção adicional de sólidos através de processos como floculação e coagulação, e em alguns casos, desinfecção (WHO, 2006).

4.4 Digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo microbiológico natural que se executa na ausência de oxigênio no qual a matéria orgânica é transformada em biomassa e compostos orgânicos. Devido à implementação de técnicas que conseguem separar o tempo de retenção hidráulica do tempo de retenção celular, tem se transformado em uma técnica de tratamento de águas residuárias altamente competitiva (SAVON et al., 2003). No Brasil esta tecnologia encontra-se bem estabilizada, sendo considerada como uma das principais alternativas no tratamento de esgoto doméstico (FLORENCIO et al., 2006).

O tratamento anaeróbio tem como característica a produção de biogás que contém principalmente metano numa porcentagem entre 60% e 80% e dióxido de carbono (40-20%). Adicionalmente apenas 5% – 10% da demanda química de oxigênio (DQO) tratada é utilizada para formação de novas colônias bacterianas em comparação com 50-70% de um processo aeróbio. Uma desvantagem desse processo é sua lentidão, fato que obriga a utilizar altos tempos de residência por tanto, requer-se de reatores ou digestores com alta concentração de microrganismos (FERNÁNDEZ – ALBA et al., 2006).

Dentre os vários sistemas de tratamento anaeróbio de resíduos líquidos encontram-se a fossa séptica conhecida também como decanto-digestor ou tanque séptico, lagoas anaeróbias, filtros anaeróbios, reatores de leito fluidizado e reatores anaeróbios de fluxo ascendente e manta de lodos (FLORENCIO et al., 2006).

Segundo Torres (2012) os sistemas anaeróbios aplicados ao tratamento de águas residuárias domésticas são muito utilizados, principalmente nos países de clima tropical e subtropical onde as temperaturas superiores a 20° C, além de outras condições climáticas são favoráveis para sua operação. No Brasil centenas de unidades

de tratamento anaeróbico tem sido implementadas e muitas outras encontram-se na fase de desenho e construção. A maioria desses sistemas correspondem a reatores UASB e suas variantes (VAN HAANDEL et al., 2006).

4.4.1 Reator Anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodos

O reator UASB é um tanque de processo único. A água residuária entra pelo fundo e se movimenta de forma ascendente. A manta de lodos flutuante filtra e trata o líquido e finalmente o efluente tratado sai do reator pela parte superior. A manta é composta por grânulos ou pequenos aglomerados de microrganismos com diâmetro de 1 mm até 3 mm que devido ao seu peso não são retirados do tanque no fluxo ascendente do material (TILLEY et al., 2014). A Figura 1 representa o esquema do reator.

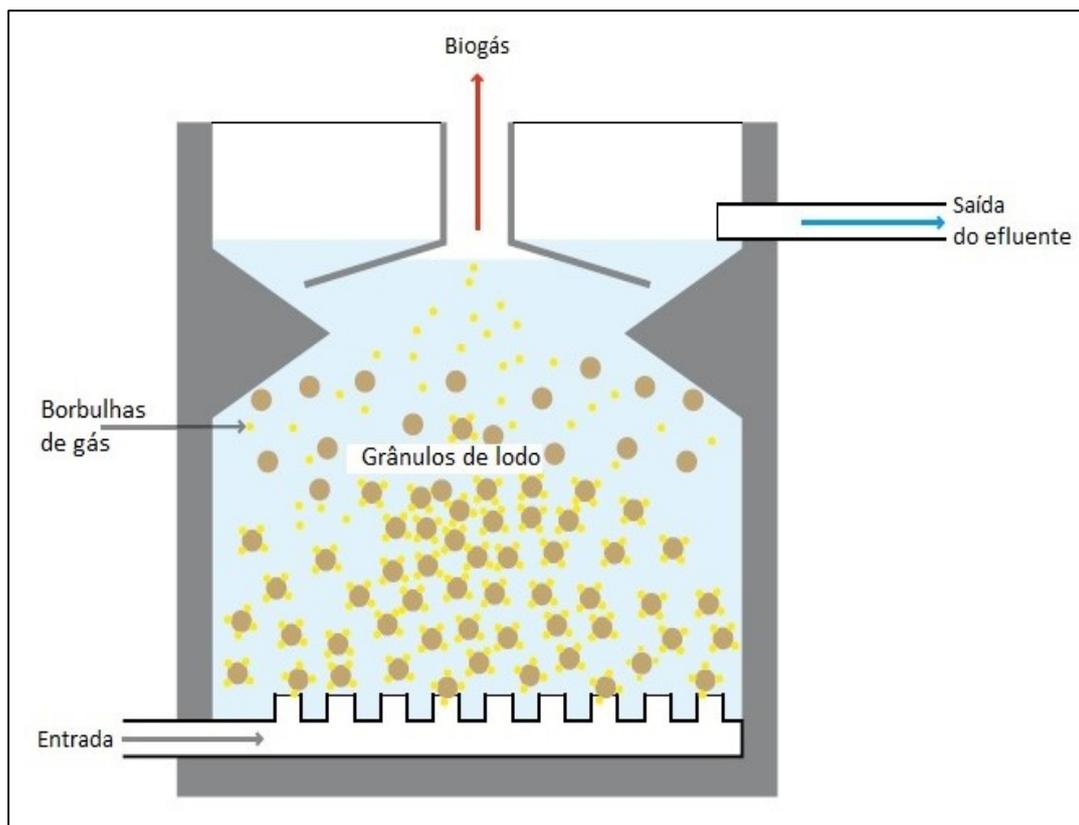


Figura 1. Estrutura de um reator UASB.

Fonte: adaptado de Tilley et al. (2014).

O movimento contínuo das borbulhas de gás permite a mistura dos grânulos com o líquido sem necessidade de auxílios mecânicos externos. Como resultado do processo o metano e o dióxido de carbono são liberados e o efluente tratado pode ser extraído da parte superior para seu posterior uso ou disposição adequada (TILLEY et al., 2014).

O tempo de retenção hidráulica encontra-se na faixa de 6 h – 10 h e o tamanho das plantas de tratamento usando reatores UASB é muito variada, desde o apropriado para uso familiar equivalente a 5 pessoas até o equivalente a 1 milhão de pessoas. Alguns desses reatores possuem outra etapa posterior de tratamento como sistemas de lodos ativados e lagoas de estabilização (VAN HAANDEL et al., 2006).

Segundo Van Haandel et al. (2006) com tempo de retenção superior a 6 horas o UASB tem uma eficiência de remoção de DQO superior a 80%. Von Sperling et al. (2001) obtiveram eficiências entre 69% e 84% na remoção de DQO com um reator UASB tratando águas residuárias municipais da cidade de Belo Horizonte – MG com uma concentração média de DQO de 174 mg/L.

4.4.2 Filtro anaeróbio

O filtro anaeróbio é um sistema de tratamento biológico de leito fixo com uma ou várias câmaras de filtração que podem trabalhar em série. Os resíduos líquidos fluem através do filtro e neste movimento as partículas ficam presas e a de matéria orgânica é degradada pelas bactérias ativas que cobrem a superfície do material filtrante (TILLEY et al., 2014). Geralmente esse tipo de filtros são utilizados como complemento de sistemas de decanto digestor e devido aos parâmetros de qualidade, o dimensionamento dos filtros resulta em unidades de grande volume o que limita sua aplicabilidade às pequenas populações (CAMPOS, 1999).

Este tipo de filtro possui uma eficiência de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) de 50% até 80%, porém, o nitrogênio total removido geralmente não ultrapassa 15% (TILLEY et al., 2014). Segundo Campos (1999) quando são bem operados, os filtros anaeróbios produzem efluentes com sólidos sedimentáveis inferiores a 1 mg/L.

4.4.3 Decanto digestor

O decanto digestor ou fossa séptica consiste em um tanque de concreto, fibra de vidro ou plástico para o tratamento primário para águas residuárias, principalmente esgoto doméstico. Os sólidos e a matéria orgânica são retirados mediante processos de sedimentação e digestão anaeróbia, mas consiste em um tratamento moderado (TILLEY et al., 2014). O tanque séptico tem sido muito utilizado no meio rural em comunidades de diversos tamanhos carentes de serviço público de coleta e tratamento de esgoto (FLORENCIO et al., 2006).

Durante o processo, o resíduo flui através do tanque e as partículas sólidas mais pesadas sedimentam, enquanto que uma camada composta principalmente por óleos e gordura flutua na parte superior. Os sólidos depositados no fundo do tanque são degradados de forma aeróbia. No entanto, a taxa de digestão é mais lenta do que a taxa de acumulação, por isso o lodo do fundo deve ser removido periodicamente (TILLEY et al., 2014).

Segundo Campos (1999) a fossa séptica apresenta uma remoção de DBO entre 35% e 60%. Diante disso o processo geralmente é complementado com um filtro anaeróbio como pós tratamento do efluente. O tanque séptico remove a maioria dos sólidos em suspensão os quais depois de sedimentar são digeridos de forma anaeróbia e o filtro complementa o processo com a remoção do DBO solúvel (FLORENCIO et al., 2006). Quando a fossa é seguida de filtro anaeróbio a porcentagem de remoção aumenta para valores entre 75% e 85% sendo o único sistema anaeróbio que dispensa de pós tratamento aeróbio para atender a limitação de DBO do efluente de 60 mg/L (CAMPOS, 1999).

4.5 Utilização de águas residuárias tratadas na agricultura

O reuso da água é uma atividade que apresenta grandes vantagens econômicas e ambientais. É uma fonte confiável de água para seu uso na irrigação tanto na agricultura quanto no manejo de áreas paisagísticas, para a recarga de aquíferos, na indústria e em outras aplicações urbanas, motivo pelo qual se diminui o descarte da

água residuária em corpos superficiais favorecendo a gestão sustentável dos recursos hídricos (ALVES, et al., 2011).

Nos últimos anos em diversos países (Estados Unidos, México, Brasil, França, Itália, Espanha, Portugal, Israel, Kuwait, Austrália, China) têm-se conduzido pesquisas visando o uso de águas residuárias na agricultura e atualmente é considerada uma alternativa de muita importância, especialmente naquelas regiões onde os recursos hídricos são escassos. Atualmente o maior volume de águas residuais tratadas corresponde a seu uso agrícola tanto nos países com sistemas agrícolas mais desenvolvidos quanto nos países em desenvolvimento (DO MONTE & ALBUQUERQUE, 2010).

Mesmo sendo uma opção que pode gerar grandes benefícios, os sistemas de irrigação que utilizam esse recurso, não podem ser manejados da mesma forma do que os sistemas que usam o recurso hídrico em condições normais. Santos et al. (2006) mencionam que a utilização desse tipo de água especial possui vantagens ambientais na produção agrícola, porém, precisam do desenvolvimento de metodologias que reduzam o risco de contaminação do solo, do produto e dos agricultores, fazendo uma gestão cuidadosa da sua utilização dentro do processo produtivo especialmente do ponto de vista microbiológico. Para Vale et al., (2013) ainda existem dificuldades na utilização de águas residuárias na agricultura mas consideram que mesmo assim pode ser uma alternativa viável e segura sem prejuízos ao ambiente.

Para Do Monte & Albuquerque (2010), o efluente tratado à ser usado em irrigação deve cumprir tanto com os requisitos agronômicos para satisfazer os requerimentos hídricos das culturas e conduzir nutrientes sem fornecer substâncias tóxicas para as plantas, quanto com os requisitos de saúde pública. Diante disso o tratamento da água residuária constitui o principal fator a ser considerado no processo de reutilização de água para irrigação.

Devido a que a disponibilidade de água de boa qualidade não consegue atender a demanda agrícola na região mediterrânea, Capra & Scicolone (2004) avaliaram a utilização de efluentes de águas residuárias em sistemas de irrigação por gotejamento com cinco tipos diferentes de filtros e vários modelos de gotejadores de tipo vórtex e labirinto. Através da experiência adquirida em pesquisas deste tipo e outras desenvolvidas no laboratório, os fabricantes têm feito modificações no desenho dos

gotejadores e outros componentes do sistema para prevenir o entupimento. Entre as modificações estão a colocação da entrada ao labirinto no centro do fluxo, sistemas de autolimpeza durante a operação do emissor e não somente ao início e ao final das irrigações, sistemas antidrenantes, entre outros (NETAFIM, 2014). Atualmente o equipamento para filtragem é um componente de uso obrigatório em todos os sistemas de irrigação por gotejamento (ROWAN et al., 2013).

4.6 Irrigação por gotejamento

O gotejamento é classificado dentro dos sistemas de irrigação localizada de alta frequência e baixa vazão que inclui outros sistemas como difusão e micro aspersão (PIZARRO, 1995). Essa técnica de irrigação está desenhada para aplicar água e fertilizantes no solo de forma direta dissipando a energia seguindo um padrão determinado. O dispositivo de saída encarregado de liberar a água é conhecido como emissor (KELLER & KARMELI, 1974). Os sistemas de irrigação por gotejamento descarregam a água em cada planta, assim a uniformidade da aplicação depende da uniformidade na descarga dos emissores, eliminando um fator limitante em outros sistemas que é o percurso da água no ar ou no solo antes de chegar nas plantas. Os emissores estão desenhados para dissipar a pressão e descarregar uma vazão pequena e uniforme que não deve variar significativamente por causa de diferenças pequenas na pressão (KELLER & BLIESNER, 1990). São os elementos mais importantes e também mais delicados do sistema.

Segundo Pizarro (1995) a dificuldade no desenho construtivo dos gotejadores consiste em aplicar uma vazão baixa com o objetivo de que as tubulações do sistema tenham um diâmetro pequeno para diminuir o custo inicial do projeto e por outra parte a pressão de trabalho não pode ser muito baixa para minimizar o efeito que tem o desnível do terreno e as perdas de carga nas linhas sobre a uniformidade do sistema.

As duas condições, vazão baixa e pressão alta provocam desde o ponto de vista hidráulico que os emissores sejam dispositivos com passagem de água com dimensões reduzidas, mas isso contrasta com outra característica que devem ter os emissores: o diâmetro da passagem deve ser o maior possível para evitar obstruções e o entupimento físico. Para resolver esse problema os fabricantes têm desenvolvido soluções muito

variadas, motivo pelo qual existem muitos tipos de emissores no mercado: autocompensantes, tipo vórtex, microtubos, de labirinto, entre outros (PIZARRO, 1995).

4.6.1 Hidráulica dos emissores

Os emissores dissipam a energia da tubulação na rede hidráulica de diversas formas, por exemplo com saídas estreitas ou trajetórias de fluxo muito extensas ou labirínticas. Dessa forma diminuem a pressão na saída da água permitindo uma descarga de poucos litros por hora. Após sua aplicação a água é distribuída de acordo com seu movimento ao longo do perfil, o qual é definido pelas características do solo (KELLER & KARMELI, 1974).

Para cada tipo de gotejador existe uma relação entre pressão e vazão que pode ser expressada mediante a equação do emissor (KELLER & BLIESNER, 1990).

$$q = K * H^x \quad [1]$$

Em que,

q: vazão do emissor (L h⁻¹);

K: coeficiente de descarga;

x: expoente da pressão que caracteriza o regime de fluxo;

H: pressão na entrada do emissor (mca).

Os valores de K e x são típicos de cada tipo de emissor. Ambas constantes podem ser determinadas com ajuda da tabela fornecida pelo fabricante ou da curva vazão – pressão através das seguintes expressões (PIZARRO, 1995):

$$x = \frac{\ln(q_1/q_2)}{\ln(H_1/H_2)} \quad [2]$$

e

$$K = \frac{q_1}{H_1^x} \quad [3]$$

O expoente de pressão “x” corresponde ao tipo específico do emissor e o regime de escoamento e pode ser utilizado para caracterizar a performance hidráulica de qualquer emissor (MANDRAMOOTOO et al., 1987). É também uma medida da sensibilidade dos emissores às variações na pressão dentro do sistema, ou seja, do efeito das mudanças de pressão sobre a vazão.

Tabela 3. Expoentes de pressão de diferentes emissores

Emissor	x
De regime laminar	1,0
Microtubo	0,75 - 1,0
Helicoidal	0,65 - 0,75
De regime turbulento (orifício, labirinto)	0,5
Vórtex	0,4
Autocompensante	0,0 - 0,4
Teórico perfeitamente autocompensante	0,0

Fonte: Pizarro (1995).

Além da relação vazão – pressão é interessante saber a faixa de operação do emissor, na qual tem um funcionamento normal. Os fabricantes fornecem um valor conhecido como vazão nominal, a qual corresponde no caso dos gotejadores à condição de trabalho com pressão de serviço 10 mca (PIZARRO, 1995). A norma ISO 9261: 2004 define as especificações e metodologias para testar equipamentos para sistemas de irrigação. Segundo esta normativa a média da vazão medida em uma amostra de 25 emissores não pode se desviar da vazão nominal mais de 5% (emissor categoria A) ou de 10% (categoria B).

O coeficiente de Variação do fabricante (CV_f) é uma medida da variação da vazão em emissores novos causada pelas variações na fabricação do emissor utilizando uma expressão típica da estatística, o cociente do desvio padrão pela média. O valor do CV_f deve ser fornecido pelo fabricante (ASAE, 1999). As causas mais comuns dessa variação são a incapacidade de manter a tolerância dimensional devido à

temperatura e pressão de moldagem, mudanças no material usado, variações no momento da colagem, soldadura, separação e desgaste do molde.

Este coeficiente pode ser determinado a partir da medida da descarga de uma amostra de 50 emissores como mínimo operando na pressão nominal (ASAE, 1999). O valor obtido é independente da pressão utilizada durante o teste, sempre que esteja dentro da faixa de operação do gotejador (PIZARRO, 1995). Como critério de classificação do CV_f são utilizados os valores especificados pela ASAE (2003), conforme à Tabela 4.

Tabela 4. Classificação para o Coeficiente de Variação do fabricante (CV_f)

Classificação	CV_f
Excelente	0,05
Médio	0,05 -0,07
Marginal	0,07- 0,11
Ruim	0,11 -0,15
Inaceitável	> 0,15

Fonte: ASAE (2003).

Devido ao fato que este coeficiente corresponde à variação da descarga por fatores construtivos e aceitando que os valores das descargas obtidas no teste correspondem a uma distribuição normal, podem ser obtidos valores do grau de influência que tem esses fatores na uniformidade da irrigação, aproveitando as ferramentas estatísticas desenvolvidas para esse tipo de distribuição de frequências (PIZARRO, 1995).

4.6.2 Entupimento dos emissores

Na operação dos sistemas de irrigação por gotejamento o problema encontrado com maior frequência é o entupimento. Para Keller e Bliesner (1990), a principal dificuldade consiste em que as obstruções são difíceis de detectar e as soluções corretivas como a limpeza ou substituição dos gotejadores bloqueados é cara. Os sistemas de irrigação por gotejamento precisam que a água que chega aos emissores tenha um alto grau de limpeza, para evitar obstruções nos mesmos, uma vez que o

entupimento dos gotejadores constitui o maior problema dessa técnica de irrigação (GOMES, 1994).

As obstruções dos emissores podem ter origem química, física ou biológica (CAPRA & SCICOLONE, 2004). As causas do entupimento de origem física são partículas orgânicas ou minerais suspensos na água. O principal agente químico é a precipitação de substâncias presentes na água de irrigação ou nos fertilizantes e biologicamente as causas são: algas, fungos e mucilagem causada por comunidades bacterianas. O entupimento químico é considerado o mais difícil de localizar e tratar, pelo qual requer tratamentos preventivos frequentes, para evitar depósitos de carbonato ou sulfato de cálcio e magnésio ou óxidos de ferro, os quais são pouco solúveis (NAKAYAMA & BUCKS, 1991).

O entupimento dos emissores é a maior preocupação nos sistemas de irrigação por gotejamento por causa dos altos níveis de sólidos suspensos, matéria orgânica e nutrientes nos efluentes de águas residuárias tratadas (ROWAN et al., 2013). Para Keller e Bliesner (1990), o principal efeito negativo do entupimento é a baixa distribuição do fluido ao longo das linhas laterais. Esta situação pode prejudicar a cultura de forma importante se os emissores permanecerem entupidos por um período muito longo. Sobre a origem e causa das obstruções nos gotejadores Bucks et al. (1979) e Capra & Scicolone (1998) desenvolveram pesquisas e avaliações de sistemas em funcionamento no campo para determinar os principais parâmetros relacionados a qualidade da água, os quais estão resumidos na Tabela 5.

A distribuição da água na área irrigada pode ser avaliada mediante vários coeficientes, um deles é o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) (KELLER & KARMELI, 1974), outra expressão utilizada é o método de avaliação de uniformidade em campo conhecida como Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), proposto por Bralts & Kesner (1983). Também é utilizado o Coeficiente de variação na vazão segundo a relação estatística descrita previamente.

Tabela 5. Fatores potenciais de entupimento de gotejadores

Fatores	Risco de entupimento					
	Baixo		Moderado		Severo	
	a	b	a	b	a	b
Sólidos suspensos (mg . L ⁻¹)	< 50	< 200	50 - 100	200 - 400	> 100	> 400
CE (mS . cm ⁻¹)	< 0,8	< 1,0	0,8 - 3,1	1,0 - 4,5	> 3,1	> 4,5
pH	< 7		7 - 8		> 8	
Ferro total (mg . L ⁻¹)	< 0,2	< 0,5	0,2 - 1,5	0,5 - 1,2	> 1,5	> 1,2
Manganês (mg . L ⁻¹)	< 0,1	< 0,7	0,1 - 1,5	0,7 - 1,0	> 1,5	> 1,0
Cálcio (mg . L ⁻¹)	< 250		250 - 450		> 450	
Magnésio (mg . L ⁻¹)	< 25		25 - 90		> 90	
Sulfeto de hidrogênio (mg . L ⁻¹)	< 0,2		0,2 - 2,0		> 2,0	
População bacteriana (UFC . L ⁻¹)	< 10 ⁴		10 ⁴ - 5x10 ⁴		> 5x10 ⁴	

Nota: (a) De acordo com Bucks et al. (1979); (b) Segundo Capra & Scicolone (1998).

Fonte: Adaptado de Capra & Scicolone, 1998.

Os parâmetros definidos pela ASAE para a classificação dos sistemas de irrigação a partir do CUD e CUE mencionados podem se observam na Tabela 6.

Tabela 6. Classificação de coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de uniformidade estatístico (CUE)

Classificação	CUD	CUE
	%	
Excelente	94 - 100	95 - 100
Bom	81 - 87	85 - 90
Razoável	68 - 75	75 - 80
Ruim	56 - 62	65 - 70
Inaceitável	< 50	< 60

Fonte: ASAE, 1996.

Rowan et al. (2013) conduziram um estudo para avaliar o desempenho de três tipos de gotejadores especialmente desenhados para trabalhar com águas residuárias e um gotejador de uso agrícola funcionando com diferentes fontes de água (água de abastecimento, efluente primário de tanque séptico e efluente secundário de filtro de areia) concluíram que a qualidade da água apresentou um maior efeito na performance do sistema do que o tipo de gotejador, porém o emissor de uso agrícola teve maiores níveis de entupimento e menor uniformidade de distribuição.

Trabalhando com várias combinações de esgoto doméstico primário e água de abastecimento Vale et al., (2013) observaram que gotejadores não autocompensantes de baixa vazão ($1,6 \text{ L h}^{-1}$) tiveram reduções do CUD superiores a 85% utilizando 100% de esgoto, 75% de esgoto e 25% de água e 25% de esgoto e 75% de água após 48 horas de funcionamento. Verificaram que utilizar esgoto doméstico primário tem um alto risco de entupimento biológico nesse tipo de emissores e que o tratamento composto por 25% de esgoto e 75% de água de abastecimento teve o maior coeficiente de variação da vazão apresentando maior susceptibilidade ao entupimento.

No ano de 2012, Silva et al. avaliaram o desempenho hidráulico de um gotejador externo autocompensante de vazão nominal de 4 L h^{-1} trabalhando em campo com três diferentes efluentes de esgoto doméstico tratado por meio de testes de uniformidade. Em termos gerais concluíram que o uso de esgoto doméstico tratado afetou de forma negativa o desempenho hidráulico dos emissores. O efluente obtido mediante tratamento secundário composto por decanto digestor associado a um filtro digestor foi o que provocou o menor impacto negativo na uniformidade de distribuição em condições de campo.

Liu e Wang (2009) estudaram a performance de três tipos de gotejadores (interno de fluxo turbulento, interno de fluxo laminar e externo autocompensante) num sistema utilizando água de abastecimento e esgoto doméstico tratado mediante lodos ativados. Os gotejadores que trabalharam com efluente foram divididos em dois subsistemas, um dos quais foi lavado periodicamente com água limpa enquanto o outro funcionou com efluente durante todo o experimento. Observaram que utilizando esgoto tratado o emissor interno de fluxo laminar sofreu maior entupimento devido as suas menores dimensões na passagem de água e que em todos os casos foi determinada a origem química como a maior causa de entupimento. Também concluíram que a lavagem não teve efeito significativo na prevenção da precipitação química.

Puig-Barguéz et al. (2005) analisaram durante 750 horas o desempenho de gotejadores não autocompensantes utilizados num sistema de irrigação com efluentes de esgoto doméstico obtidos mediante dois tratamentos: lodos ativados (secundário) e filtro de areia seguido de luz ultravioleta e cloração (terciário). Concluíram que devido ao entupimento por causas principalmente biológicas a uniformidade de distribuição de água no efluente tratado com lodo ativado diminuiu consideravelmente, em compensação o CUD dos emissores que trabalharam com efluente do tratamento

terciário se manteve entre bom e excelente durante todo o experimento e o seu coeficiente de variação foi menor a 0,10 mantendo – se num nível excelente.

4.7 Controle estatístico da qualidade

Todo processo inclusive aqueles planejados com detalhe e operados cuidadosamente possui certo grau de variabilidade inerente. Essa variabilidade natural é basicamente a soma de pequenos fatores incontroláveis ou inevitáveis (ÁLVARO, 2013). Segundo Montgomery & Runger (2003) outros tipos de variabilidade podem estar casualmente presentes na saída de um processo. Usualmente tal variabilidade é grande quando comparada com a variabilidade natural e pode significar um nível inaceitável de desempenho num processo. Essas fontes não naturais de variabilidade são conhecidas como causas atribuídas ou especiais. Um processo que esteja operando apenas com causas casuais de variação presentes pode-se dizer que está sob controle estatístico, se está operando na presença de causas especiais se diz que está fora de controle. Para Montgomery (2009) a qualidade pode ser descrita e avaliada em múltiplas formas, porém pode ser definida como adequação ao uso. Dentre as dimensões da qualidade podem ser mencionadas: performance, confiabilidade, durabilidade, facilidade de manutenção e conformidade com normativas e padrões.

O controle estatístico da qualidade pode ser definido de forma ampla como o conjunto de métodos estatísticos e de engenharia que são usados na medição, controle e melhoria da qualidade (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Os autores também afirmam que os métodos estatísticos têm um papel fundamental na melhoria da qualidade, as aplicações dessa ferramenta na engenharia e na pesquisa são: determinação da tolerância dos sistemas e seus componentes utilizando métodos estatísticos incluindo experimentos planejados, investigação de melhorias nos processos, determinação de capacidade e fornecimento de dados sobre desempenho que podem conduzir a novos e melhores projetos e produtos.

O controle estatístico de processo (CEP) é um conjunto de ferramentas para resolver problemas e alcançar estabilidade e melhorar sua capacidade diminuindo a variabilidade (MONTGOMERY, 2009). Uma das ferramentas do CEP são os gráficos de controle também conhecidos como gráficos de controle de Shewhart pois a teoria

geral foi proposta pelo Dr. Walter A. Shewhart em 1924 (ÁLVARO, 2013). Dentre os gráficos de controle para variáveis, o gráfico \bar{X} é o mais amplamente usado para monitorar a tendência central e os gráficos baseados na amplitude da amostra “R” são utilizados para controlar a variabilidade do processo (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

Os gráficos de controle podem apontar a existência de causas atribuídas ou externas. A partir desse ponto pode ser identificada a origem do problema e tomar ações para eliminar seu efeito (ÁLVARO, 2013). Quando a finalidade do gráfico de controle é detectar mudanças no processo as amostras são colhidas em subgrupos racionais que consistem em unidades que são produzidas ao mesmo tempo ou tão próximas quanto for possível (MONTGOMERY, 2009).

Para Montgomery & Runger (2003) no projeto de um gráfico de controle é necessário especificar tanto o tamanho da amostra a utilizar quanto a frequência da amostragem. Para construir um gráfico sobre alguma característica W é necessário conhecer sua média μ_w e seu desvio padrão σ_w . Assim a linha central e os limites superior e inferior de controle serão (ÁLVARO, 2013):

$$LSC = \mu_w + k\sigma_w \quad [4]$$

$$LC = \mu_w \quad [5]$$

$$LIC = \mu_w - k\sigma_w \quad [6]$$

Sendo k a “distância” dos limites de controle a partir da linha central expressa em unidades de desvio padrão. Usualmente $k = 3$ (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). É importante destacar que a letra “sigma” se refere ao desvio padrão da estatística que está plotada no gráfico, ou seja, é o desvio padrão das médias obtidas e não o desvio padrão das amostras coletadas para a determinação dessas médias da característica W.

Quando os parâmetros μ e σ forem desconhecidos, geralmente são estimados com base nas amostras preliminares, coletadas quando o processo estava aparentemente sob controle estatístico. Recomenda-se o uso de no mínimo 20 a 25 amostras preliminares. Supondo que existem m amostras preliminares, cada uma delas de tamanho n onde n será tipicamente 4, 5 ou 6, a média amostral para a i -ésima amostra será \bar{X}_i . Dessa forma a média da população pode ser estimada pela média global (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i \quad [7]$$

Dessa forma, pode-se tomar $\bar{\bar{X}}$ como o valor para a linha central do gráfico de controle. Utilizando a relação entre a amplitude r das amostras provenientes da população normal com parâmetros conhecidos e o desvio padrão dessa população as equações [7], [8], e [9] são redefinidas (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{r} \quad [8]$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad [9]$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{r} \quad [10]$$

Em que a constante A_2 é tabelada para vários tamanhos de amostra.

Usualmente é necessário obter informação sobre a capacidade de processo, que equivale ao desempenho do processo quando estiver operando sob controle. Essa grandeza pode ser expressada através de ferramentas como o gráfico de tolerância e o índice de capacidade de processo ICP que pode ser calculado segundo a expressão (MONTGOMERY, 2009).

$$ICP = \frac{LSE - LIE}{6\sigma} \quad [11]$$

Onde LSE e LIE correspondem aos limites superior e inferior de especificação, correspondente ao grau de qualidade esperado ou requerido no produto ou processo e σ é o desvio padrão, considerando os limites de 3σ em cada lado da média do processo. Na Tabela 7 apresentam-se os valores recomendados para este índice.

Tabela 7. Valores mínimos recomendados para a razão de capacidade de processo

Tipo de processo	Especificações	
	Ambos lados	Mín. ou Máx.
Existente	1,33	1,25
Novo	1,50	1,45
Parâmetro crítico em novo processo	1,50	1,45
Parâmetro crítico em processo existente	1,67	1,60

Fonte: Montgomery, 2009.

REFERÊNCIAS

ÁLVARO, J. A. H. **Sistema de indicadores para la mejora y el control integrado de la calidad de los procesos**. Castelló de la Plana, Espanha: Segunda edição, Universitat Jaume I Publicacions, 2013, 230 p.

ALVES, D, DO MONTE H. M.; ALBUQUERQUE, A. **Water reuse projects – technical and economical sustainability**. Official Publication, European Water Association (EWA), 2011.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Field Evaluation of Microirrigation Systems**. Michigan: ASAE EP 458, p.792-797, 1996.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **CIGR Handbook of Agricultural Engineering Vol I: Land and Water Engineering**. Michigan: ASAE, 1999, 575 p.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS – ASAE. **Design and installation of microirrigation systems**. Michigan: ASAE EP 405.1, 2003.

BELLINI, G.; LUPIA, F.; DE SANTIS F. **Water use for irrigation purpose in agriculture: the integration of a modelling approach and the Six Agriculture Census survey**. Roma, Itália, 2010.

BONET, P. C.; RICARDO, M. P. C. Calidad del agua del Riego y su posible efecto en los rendimientos agrícolas en la Empresa de Cultivos Varios Sierra de Cubitas. **Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias**, v. 20, n. 3, La Habana, Cuba, p .19 – 23, 2011.

BRALTS, V.F.; KESNER, C. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.24, n.5, p.1369-1374. 1983.

BRITO, R. A. L.; ANDRADE, C. L. T. Qualidade da água na agricultura e no ambiente. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte – MG, v.31, n. 259, p. 50 – 57, 2010.

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

CAMPOS, J. R (Coordenador). **Tratamento de esgotos sanitários por processo anaeróbio e disposição controlada no solo**. Rio de Janeiro: ABES, 1999, 464 p.

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

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 68, n. 2, p. 135 – 149, 2004.

CARARO, D. C. **Manejo de irrigação por gotejamento para aplicação de água residuária visando a minimização do entupimento dos emissores**. Tese (Doutorando em Agronomia, Área de Concentração: Irrigação e Drenagem). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP, 2004. 149 f.

COMMISSION INTERNATIONALE DU GENIE RURAL – CIGR. **Water, environment and agriculture: challenges for sustainable development**. First Inter-Regional Conference on Land and Water Challenges. Bari, Itália, 2013.

DANTAS R. M. L. **Hidroponia utilizando águas salobras nos cultivos de agrião e couve chinesa**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2012. 86 f.

DO MONTE H. M.; ALBUQUERQUE, A. **Reutilização de águas residuais – Guia Técnico**. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa, Portugal, 2010.

FERNÁNDEZ – ALBA, A. R.; LETÓN, P. G.; ROSAL, R.G.; DORADO, M. V.; VILLAR, S.F.; SANZ, J. M. G. **Tratamientos avanzados de aguas residuales industriales**. Madri, Espanha, Elecé Industria Gráfica, Dirección General de Universidades e Investigación, 2006, 136 p.

FLORENCIO, L.; BASTOS, R. K. X.; AISSE, M. M. (Coordenadores). **Tratamento e utilização de esgotos sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, 2006, 427 p.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Descubrir el potencial del agua para la agricultura**. Roma, Itália: FAO, 2003, 72 p.

GOMES, H. P. **Engenharia de irrigação: hidráulica dos sistemas pressurizados aspersão e gotejamento**. Campina Grande, PB, Editora Universitária UFPB, 1994, 344 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION – ISO. **ISO 9261: 2004 Agricultural irrigation equipment – Emitters and emitting pipe – Specification and test methods**. Norma técnica, Génova, Suíça, 2004, 16 p.

KELLER, J.; BLIESNER R. D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York, U.S.A, Van Nostrand Reinhold, 1990, 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. **Trickle irrigation design**. California: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975, 133 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, Michigan, p. 678 – 684, 1974.

LIU, H.; WANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent, **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 745 – 756, 2009.

MANDRAMOOTOO, C. A.; KHATRI, K. C.; RIGBY, M. Hydraulic performance of five different trickle irrigation emitters. **Canadian Agricultural Engineering**, Quebec, n. 30, p. 1 – 4, 1987.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control**. United States: Sexta edição, John Wiley & Sons Inc., 2009, 734 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros**. Rio de Janeiro: Segunda edição, LTC.2003, 463 p.

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

NETAFIM. **Bioline Dripline Catalog**. Fresno, California. 2014. Disponível em: <<http://www.netafimusa.com/files/literature/wastewater/W064-Bioline-Dripline.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2015.

PESCOD, M. B. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Roma, Itália, 1992, 156 p.

PIZARRO, C. F. **Riegos localizados de alta frecuencia**, Bilbao, Espanha: Terceira edição Ediciones Mundi-Prensa, 1995, 511 pp.

PUIG – BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents, **Agricultural Water Management**, n 77, p. 249 – 262, 2005.

REINALDO, G. P. B.; BATISTA, R. O.; DA SILVA, P. C. M.; FILHO, L. C. A. L.; NETO, M. F.; DOS SANTOS, D. B. Desempenho de sistema decanto digestor com filtro biológico seguido por alagado construído e reator solar no tratamento de esgoto doméstico. **Revista Ambiente & Água**, v. 7, n. 2, p. 62 – 74, 2012.

ROWAN, M.; MANCL, K. M.; TUOVINEN, O. H. Evaluation of drip irrigation emitters distributing primary and secondary wastewater effluents irrigation and **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, n. 2, v. 3, 2013.

SANTOS, S. S.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; MANTOVANI, E. C.; BATISTA R. O.; MELO J. C. Contaminação microbiológica do solo e dos frutos de cafeeiros fertirrigados com esgoto sanitário. **Engenharia na Agricultura**, v. 14, n. 1, Viçosa, MG, p. 16 – 22, 2006.

SARKINNOMA, A.; YARKASUWA, C. I.; MODU, K. A. Analysis of Physicochemical Parameters of Sewage Water used for Irrigation in Bauchi Metropolis – Nigeria. **Journal of Environment and Earth Science**, v. 3, n. 10, p. 31 – 41, 2013.

SAVÓN, R. C. B.; PÉREZ, S. R.; ABREU, M. C. M.; BROWN, A. I. T. Ventajas del empleo de reactores UASB en el tratamiento de residuales líquidos para la obtención de biogás. **Tecnología Química**, v. 23, n. 2, La Habana, Cuba, p. 37 – 44, 2003.

SCHOLZE, R. J. **Water Reuse and Wastewater Recycling at US Army Installations**, US Army Corps of Engineers, Arlington, VA, USA, 2011.

SILVA, L. P.; SILVA M. M.; CORREA, M. M.; SOUZA, F. C. D.; SILVA, E. F. F. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.5, Campina Grande, PB, p. 480 – 486, 2012.

TILLEY, E.; ULRICH, L.; LÜTHI, C.; REYMOND, P.; ZURBRÜGG, C. **Compendium of Sanitation System and Technologies**, Belley, França: Segunda edição, International Water Association, 2014.

TORRES, P. Perspectivas del tratamiento anaerobio de aguas residuales domésticas en países en desarrollo. **Revista EIA, Escuela de Ingeniería de Antioquia**, v. 9, n. 18, Medellín, Colômbia, p. 115 – 129, 2012.

UNITED NATIONS EDUCATION, SCIENCE AND CULTURE ORGANIZATION - UNESCO. **Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo. Agua para todos, agua para la vida**, 2003.

VAN HAANDEL, A.; KATO, M. T.; CAVALCANTI, P. F. F.; FLORENCIO, L. Anaerobic reactor design concepts for the treatment of domestic wastewater. **Reviews in Environmental Science and Bio/Technology**, v. 5, n. 1, p. 21 – 38, 2006.

VALE, H. S. M.; ARRUDA, L. E. V.; COSTA, D. O.; COSTA, F. G. B.; BATISTA, R. O. Potencial de entupimento de um sistema de irrigação por gotejamento operando com esgoto doméstico tratado. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, Cruz das Almas, BA, p. 63 – 70, 2013.

VON SPERLING, M.; FREIRE, V. H.; DE LEMOS CHERNICHARO, C. A. Performance evaluation of a UASB – activated sludge system treating municipal wastewater. **Water Science and Technology**, v. 43, n. 11, p. 323 – 328, 2001.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **WHO Guidelines for the safe use of wastewater, excreta and greywater, v 2: Wastewater Use in Agriculture**. Geneva, Suíça: WHO, 2006, 222 p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture**. Geneva, Suíça: WHO, 1989, 76 p.

ZAIDAN, L. E. M. C.; DE MORAES S. C. G.; NAPOLEÃO D. C.; MARQUES L. P.; DE SOUZA, D. P.; DA SILVA, A. M. R. B.; DA SILVA, V. L. Aplicação de análise de componentes principais em dados de tratamento anaeróbio de águas residuárias domésticas do município de Ibimirim em Pernambuco. **XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Maceió, 2011.

**CAPÍTULO 2: PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTES
DE ESGOTO TRATADO**

PERFORMANCE DE UM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTES DE ESGOTO TRATADO

RESUMO

Nos últimos anos, o uso de água residuária tratada tem se destacado mundialmente tanto para aplicações paisagísticas quanto para a agricultura. As condições climáticas e hidrológicas do sertão nordestino do Brasil provocam menor disponibilidade do recurso hídrico de boa qualidade. O objetivo do presente trabalho foi avaliar o desempenho de sistema de irrigação por gotejamento sob condições de campo utilizando efluentes de esgoto doméstico tratado. O experimento foi conduzido na Estação Piloto de Tratamento de Esgoto localizada em Ibimirim, Pernambuco. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso. Os tratamentos, tipo de água e tipo de gotejador, distribuídos em parcela subdividida. Foi montado um sistema composto por quatro tipos de gotejadores, dois externos e dois internos, sendo um dos internos não autocompensante. Os emissores funcionaram com três tipos de efluente doméstico provenientes de Reator UASB, filtro digestor em associação com decanto digestor, filtro digestor e água de abastecimento como tratamento testemunha. Realizaram-se três avaliações do sistema às 0,5, 7 e 55 horas de funcionamento nas quais foi medida a vazão de 16 gotejadores em cada linha lateral. Foram calculados vazão média, Coeficiente de Variação do fabricante (CV_f) Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE), Coeficiente de Variação da Vazão (CV_q) e grau de entupimento dos emissores. Os resultados mostraram que a condição inicial de todos os emissores novos foi excelente, porém, de forma geral o uso de efluentes reduziu o desempenho do sistema, especialmente quando usado com o gotejador externo de saída lateral, causando o entupimento de uma alta porcentagem de emissores. Não houve diferença em relação ao desempenho dos emissores não autocompensantes. O emprego de efluentes domésticos ocasionou redução no Coeficiente de Variação da vazão em comparação com o uso de água de abastecimento.

Palavras chave: reúso de água, uniformidade, entupimento de emissores.

PERFORMANCE OF DRIP IRRIGATION SYSTEM USING TREATED WASTEWATER EFFLUENTS

ABSTRACT

In last years, treated wastewater became more important worldwide, not only for landscaping but also in agricultural practices. Hydrologic and climate conditions in northeast Brazil promote scarcity of good quality water resource. The objective of this study was to evaluate a performance of a drip irrigation system under field conditions using treated wastewater effluents. The experiment was carried in a Pilot Sewage Treatment Plant located in Ibimirim, Pernambuco. Experimental design was randomized blocks. Two treatments, water type and kind of emitter distributed in a split-plot design. The drip irrigation system was assembled with four kinds of emitters, two inline labyrinth type and two online, where one of inline drippers was non-pressure compensating. Emitters was supplied with three kinds of treated sewage effluents coming from an UASB reactor, Anaerobic filter associated with a Septic tank, Anaerobic filter and fresh water as control treatment. Three tests was performed through the execution of experiment at 0,5; 7 and 55 operation hours to measure the discharge of 16 emitters in each lateral. Mean discharge, manufacturing coefficient of variability (Mfg CV), emission uniformity (EU), statistical uniformity coefficient (Us), mean discharge ratio coefficient (Dra) and percentage of emitter clogging was calculated. Results showed that all emitters had excellent initial condition but mostly, the use of sewage effluents reduced the system's performance, especially when used with online side outlet dripper, causing clogging of a large percentage of emitters. There was no difference in performance of system using non-pressure compensating emitters. The use of treated wastewater effluents promoted reduction in the mean discharge ratio when compared system operating with fresh water.

Keywords: water reuse, uniformity, emitter clogging.

INTRODUÇÃO

Na atualidade existe uma grande pressão sobre os recursos naturais em geral, principalmente o hídrico. O volume total de água no planeta é finito e a população cresce continuamente. O panorama torna-se ainda mais complexo considerando o fato que sua distribuição temporal e espacial não é uniforme, existindo regiões áridas e semiáridas onde a quantidade do recurso líquido é ainda mais limitada. Para Dantas (2012) as condições hidrológicas, climáticas e geológicas predominantes no sertão da região nordeste do Brasil propiciam que o balanço hídrico seja negativo, reduzindo a quantidade dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos.

Dentre os princípios básicos para promover a melhora da produtividade da água no campo está o uso efetivo da água de qualidade inferior e uma das técnicas recomendadas é a irrigação por gotejamento (FAO, 2003). Ainda existem dificuldades na utilização de águas residuárias na agricultura apesar de que estas representam uma alternativa viável e segura. Mesmo com os riscos de entupimento por causa dos altos níveis de sólidos suspensos, matéria orgânica e nutrientes, a irrigação por gotejamento é o método mais eficaz para ser utilizado com águas residuárias (CAPRA & SCICOLONE, 2007; VALE et al., 2013; ROWAN et al., 2013). Keller & Bliesner (1990) apontaram que o principal efeito negativo do entupimento é a baixa uniformidade de distribuição da água ao longo das linhas laterais, situação que pode prejudicar a cultura se os emissores permanecerem entupidos por um período muito longo.

Efluentes de diferentes sistemas de tratamento de esgoto têm sido utilizados na pesquisa dos sistemas de irrigação por gotejamento. Zhou et al. (2015) estudaram o desempenho de um sistema operando com efluente de esgoto doméstico tratado com um sistema cíclico de lodos ativados. Para diferentes frequências de irrigação: 2, 4, 8 ou 16 dias e tempos de operação (3, 6, 12 e 24 horas respectivamente) observaram que o entupimento dos emissores foi mais severo conforme o turno de rega foi menor. O biofilme de origem biológica foi identificado como a causa principal das obstruções. Liu & Wang (2009) observaram que utilizando esgoto tratado mediante lodos ativados, o emissor interno de fluxo laminar sofreu maior entupimento devido as suas menores dimensões, identificando entupimento de origem química.

No Brasil, Batista et al. (2010) identificaram a formação de biofilme dentro dos emissores como o principal fator de entupimento de um sistema para irrigação da cultura do café, utilizando esgoto doméstico tratado. Por outra parte Capra & Scicolone (2007) em experimento desenvolvido na Itália, concluíram que a porcentagem total de emissores totalmente entupidos, a vazão média e o CUE foram influenciados negativamente pela concentração de sólidos suspensos totais (SST) presentes em seis tipos de esgoto doméstico tratado, estabelecendo assim que os gotejadores tipo vórtex são mais susceptíveis ao entupimento físico.

Vale et al., (2013) constataram que gotejadores não autocompensantes de baixa vazão ($1,6 \text{ L h}^{-1}$) tiveram reduções do CUD superiores a 85% utilizando 100% de esgoto, 75% de esgoto e 25% de água e 25% de esgoto e 75% de água após 48 horas de funcionamento. No ano de 2012 Silva et al. avaliaram o desempenho hidráulico de gotejadores externos autocompensantes de vazão nominal de 4 L h^{-1} trabalhando em campo com três diferentes efluentes de esgoto doméstico tratado. Concluíram que o uso de esgoto doméstico tratado afetou de forma negativa o desempenho hidráulico dos emissores. Em experimento desenvolvido sob condições de campo similares e os mesmos tipos de efluentes Dantas et al. (2014) não identificaram influência dos tipos de efluentes sobre os parâmetros de uniformidade de aplicação do sistema estabelecido com emissores internos autocompensantes de vazão nominal $4,0 \text{ L h}^{-1}$.

Em estudo realizado na China sob condições de laboratório Pei et al. (2013) avaliaram quatro tipos de gotejadores autocompensantes e quatro emissores não autocompensantes funcionando com efluente doméstico secundário. Estes autores observaram que os gotejadores internos autocompensantes e os gotejadores não autocompensantes de labirinto tipo serra são os mais recomendáveis para trabalhar com esse tipo de efluente. No Canadá, Rowan et al. (2013) descobriram diferenças no desempenho de gotejadores desenhados para uso com água residuária e um gotejador de uso agrícola comum, porém o tipo de água foi o fator determinante na diminuição da vazão média dos emissores.

Devido à carência de estudos sob condições reais de manejo da irrigação no campo em condições semiáridas, objetivou-se na presente pesquisa avaliar a performance de um sistema de irrigação por gotejamento composto por quatro tipos de gotejadores que funcionaram com efluente de esgoto doméstico tratado no sertão da região Nordeste do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Localização da área experimental

O experimento foi realizado na Estação Piloto de Tratamento de Esgoto no Município de Ibimirim, a 330 km de Recife localizado na latitude de 8° 32' 26'' Sul, longitude de 37° 41' 25'' Oeste, com altitude média de 401 m, na região semiárida do Estado de Pernambuco. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen é do tipo BSw'h', semiárido muito quente, com precipitação média anual de 454 mm e temperatura média anual em torno de 24,7° C.

A estação recebe o esgoto bruto na saída de um sistema de coleta municipal de águas residuárias do Bairro Lages da Cidade de Ibimirim com uma vazão de aproximadamente 450.000 L dia⁻¹. O tratamento preliminar é composto por grade grosseira, caixa de sedimentação, grade fina, caixa de areia e calha Parshall. Após o pré-tratamento, o esgoto segue para um poço úmido onde uma bomba submersa o envia para os diferentes tratamentos.

Delineamento experimental

O delineamento utilizado foi blocos ao acaso e os tratamentos distribuídos em parcela subdividida, sendo estes tratamentos tipo de água e tipo de gotejador. Com a intenção de avaliar o sistema fazendo ênfase nos emissores, as classes de água foram definidas como as parcelas e os gotejadores como subparcelas. As parcelas foram casualizadas dentro de quatro blocos, que funcionaram como as repetições do experimento. Os efluentes utilizados foram obtidos de três sistemas de tratamento independentes:

- Reator UASB híbrido em associação com uma lagoa de estabilização;
- Digestor anaeróbio associado a um filtro digestor e uma lagoa de estabilização;
- Filtro digestor associado a uma lagoa de estabilização.

Além dos efluentes utilizou-se também água de abastecimento obtida de um poço, como tratamento testemunha. Na Figura 1 pode-se observar um croqui da estação de tratamento e seus componentes.

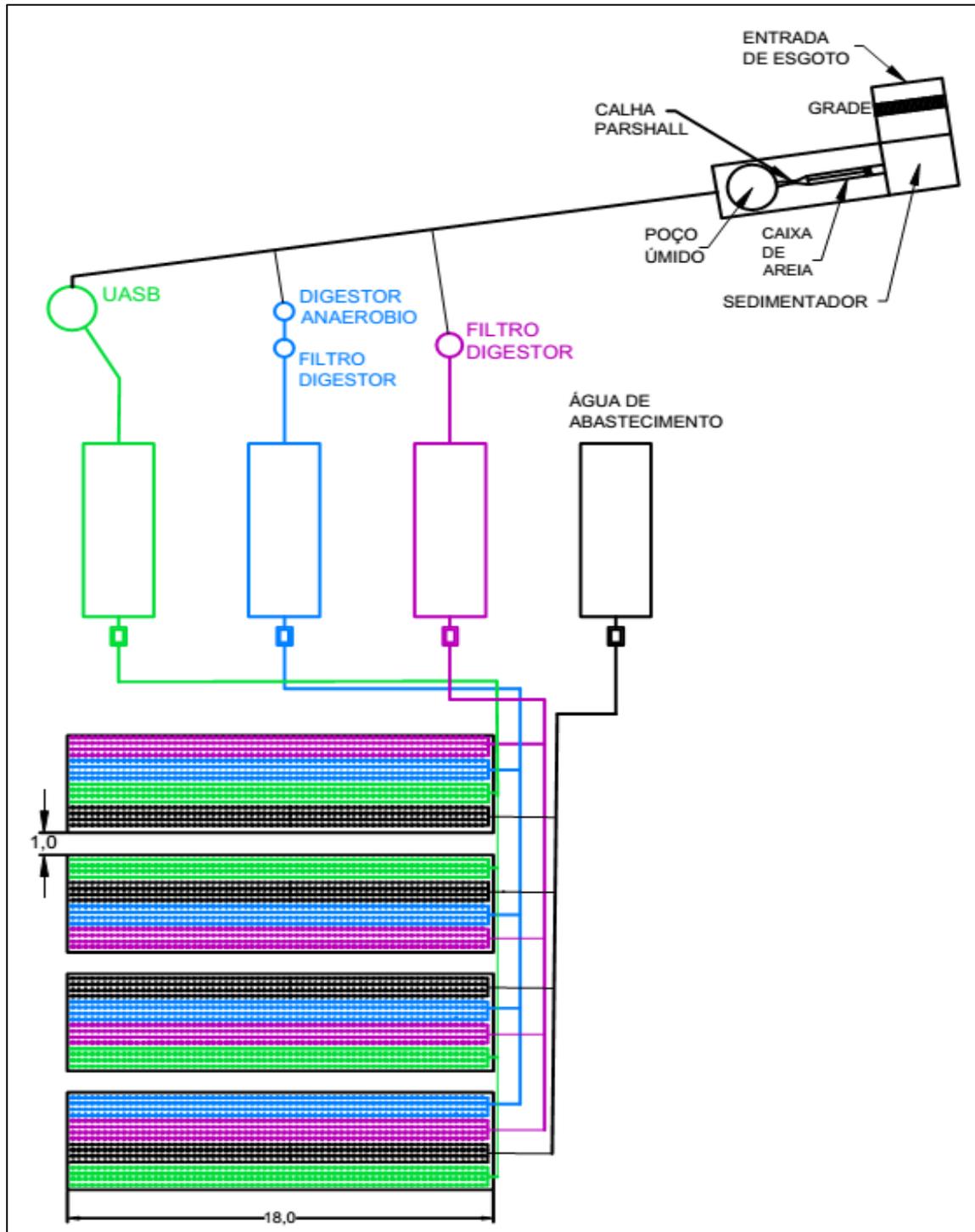


Figura 1. Configuração das instalações de coleta, tratamento de esgoto doméstico da Estação e croqui da área experimental.

Os quatro tipos de gotejadores avaliados foram: **A)** gotejador interno autocompensante de parede média (0,63 mm), **B)** gotejador interno não autocompensante de parede grossa (0,9 mm), **C)** gotejador externo autocompensante de saída superior e, **D)** gotejador externo autocompensante de saída lateral dupla. Para os emissores externos foi utilizada uma mangueira de polietileno de baixa densidade de 16 mm de diâmetro externo e 15,4 mm de diâmetro interno. Todos possuíam vazão nominal de 2,0 L h⁻¹, com exceção do gotejador **D** (2,2 L h⁻¹). As características dos emissores podem-se observar na Tabela 1.

Tabela 1. Especificações geométricas e hidráulicas dos gotejadores utilizados no experimento

Tipo	Dimensões de passagem de água (mm)			Área de filtragem (mm ²)	K	x	Pressão de operação (mca)
	Largura	Profundidade	Comprimento				
A	0,76	0,85	8	39	2	0	4 - 30
B	0,76	1,73	65	54	0,6 93	0,46	10 - 30
C	1,03	0,75	35	2	2	0	5 - 41
D	*	*	*	3,6 [†]	*	0	8 - 30

*Informação não fornecida pelo fabricante, † adaptado de Cardoso & Klar (2014).

Para a determinação da normalidade dos dados obtidos foi aplicado o teste de Kolmogorov - Smirnov utilizando uma planilha eletrônica de Excel. Realizou-se o teste F e teste de Tukey para comparação de médias, os resultados foram interpretados por meio das significâncias das análises de variância (ANOVA) e teste de médias considerando-se o nível de probabilidade de 5% no teste F.

Dimensionamento do sistema e condições de operação

Cada tipo de esgoto doméstico tratado utilizado no experimento assim como a água de abastecimento foram captados de uma lagoa de estabilização específica com capacidade efetiva de 9 m³. Foi montado um sistema de irrigação por gotejamento a partir das quatro lagoas. Em cada uma foi colocada uma moto bomba centrífuga Schneider de 0,5 cv com tubulação de sucção de 32 mm e válvula de pé e crivo. Na saída das bombas instalou-se filtros de discos de 120 mesh (130 µm). A limpeza dos filtros foi realizada utilizando um critério visual ao início do experimento, diariamente na fase média e com maior frequência no final do experimento, cada vez que a os

sólidos acumulados provocassem uma queda de pressão na entrada das linhas laterais igual ou superior a 0,5 mca.

Após o bombeamento e filtragem os fluídos foram conduzidos por tubulação de PVC de 32 mm até cavaletes construídos em PVC de 25 mm onde foram inseridos registros de gaveta seguidos de acoples rápidos para manômetro com a finalidade de regular e monitorar a pressão na entrada das linhas derivadas de PVC de 25 mm.

Laterais de 18 m de comprimento compostas por 60 gotejadores foram colocadas sobre o terreno, que não possuía declive no sentido das linhas. O espaçamento definido entre emissores foi de 0,3 m afim de obter uma faixa molhada adequada às características do solo. Para obter uma área experimental de fácil manejo e simplificar as diferentes operações de amostragem e testes o espaçamento entre laterais foi de 0,3 m. Na Figura 2 pode-se observar um exemplo da distribuição dos emissores dentro de uma das parcelas.

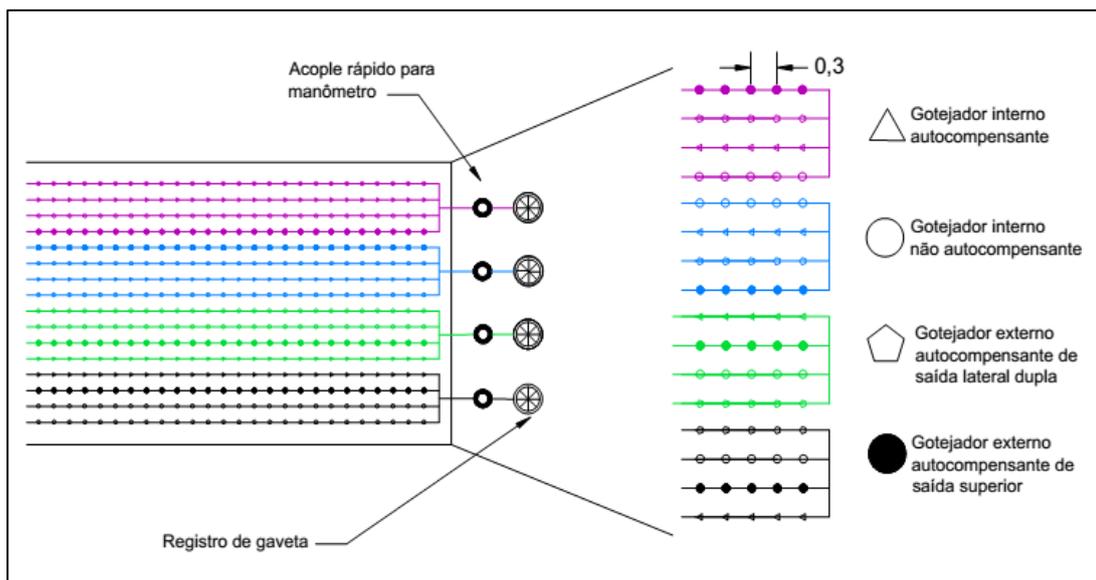


Figura 2. Disposição aleatória dos diferentes tipos de emissores dentro das parcelas.

Durante a execução das irrigações e as coletas de vazão para os diferentes testes do experimento foi utilizada pressão de serviço entre 10 mca – 10,5 mca para manter a vazão nominal no emissor não autocompensante e para atender também a faixa de pressão de compensação dos emissores autocompensantes. A pressão de entrada nas linhas derivadas foi estabelecida no início de cada irrigação com ajuda de um manômetro com capacidade máxima de 6 kgf.cm^{-2} (60 mca) e resolução mínima de

0,05 kgf.cm²⁻¹ (0,5 mca). O manômetro foi devidamente calibrado antes do início do experimento. A pressão foi monitorada e corrigida, se preciso, cada hora.

Para reproduzir o funcionamento de um sistema de irrigação de uma cultura sob condições reais utilizou-se a lâmina correspondente a 100% da evapotranspiração diária para o algodão, simulando a plantação na área experimental. Os valores foram calculados a partir dos dados horários da estação meteorológica automática do INMET (A349) que está localizada aproximadamente três quilômetros da área de estudo. O manejo da irrigação foi executado via clima, para o cálculo da lâmina ET_C foi usada a equação (ALLEN et al., 2006):

$$ET_C = ET_0 * K_C * K_L \quad [1]$$

Em que,

ET_C: evapotranspiração da cultura (mm.dia⁻¹);

ET₀: evapotranspiração potencial de Penman – Monteith (mm.dia⁻¹);

K_C: coeficiente da cultura (adimensional);

K_L: coeficiente de localização (adimensional).

Para determinação do K_L aplicou-se a metodologia descrita por Keller & Bliesner (1990) que depende da porcentagem de área sombreada pelo cultivo (S). Os valores de K_L variaram em função da estimação da área sombreada de acordo com o desenvolvimento das plantas, conforme a equação:

$$K_L = 0,1 * S^{0,5} \quad [2]$$

A utilização desta metodologia garante que mesmo quando a sombra projetada pela planta na superfície do solo seja muito pequena (inferior a 1%) o valor mínimo de KL será 0,1. Esse valor foi utilizado para o cálculo da lâmina aplicada para o molhamento da área nos três dias anteriores à simulação do semeio do algodão e até os 5 dias após o semeio, momento no qual começou – se a utilizar a equação 2.

O turno de rega foi de dois dias, o tempo de irrigação foi definido a partir da diferença entre a lâmina de evapotranspiração dos dois dias e a lâmina de precipitação do mesmo período, assumindo a aplicação desta quantidade de água com uma taxa de 2,0 L.h⁻¹ e simulando um espaçamento entre linhas de 1,2 m.

Testes de uniformidade realizados e variáveis avaliadas

A medida das vazões para realizar os testes de uniformidade e cálculo dos valores das variáveis foi feita utilizando a metodologia adotada por Merriam e Keller (1978), sendo esta executada da seguinte maneira: coleta durante 15 minutos do volume aplicado pelo primeiro emissor e pelos emissores localizados nas posições múltiplas de quatro totalizando 16 gotejadores por mangueira. Desta forma foi avaliada a vazão de emissores uniformemente espaçados incluindo os localizados a 1/3, 2/3 e no final da linha. A água foi coletada em recipientes plásticos idênticos com capacidade para 1,0 L e 19 g de massa os quais eram pesados com uma balança eletrônica logo depois da coleta.

Para recolher de forma simultânea a água dos gotejadores localizados na mesma posição em todas as mangueiras foram construídas trincheiras de 20 cm de profundidade onde colocaram – se tábuas de madeira sobre as quais foram fixados os recipientes coletores. A temperatura do efluente foi medida na superfície do reservatório e numa profundidade próxima da válvula de pé de poço no início e no final de cada avaliação. Nas Figuras 3 e 4 pode – se observar a disposição das linhas laterais sobre o solo e a configuração dos dispositivos para a coleta dos efluentes.



Figura 3. Disposição das linhas derivadas e laterais num dos blocos do experimento.



Figura 4. Sistema de trincheiras, tábuas e recipientes coletores numerados para a obtenção da água aplicada por cada gotejador.

As variáveis resposta foram a vazão média (\bar{q}), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e Coeficiente de Variação da Vazão (CVq) cujos valores foram calculados para cada linha lateral, correspondente a uma combinação de tipos de efluente e tipo de emissor.

O primeiro teste foi executado em todos os emissores das 4 linhas laterais que funcionaram com água de abastecimento no bloco mais próximo da bomba, uma para cada tipo de gotejador. Com os dados da vazão dos 60 gotejadores de cada tipo trabalhando com uma pressão de 10 mca foi calculado o Coeficiente de Variação do fabricante (CVf) e a vazão média para cada tipo de emissor. O CVf foi obtido mediante a relação:

$$CVf = \frac{s}{q_{média}} \quad [3]$$

Em que,

s: desvio padrão;

$q_{média}$: vazão média de todos os gotejadores na linha lateral ($L.h^{-1}$).

Para a determinação dos outros coeficientes foram realizadas três coletas de água. A primeira no início do experimento quando os gotejadores tinham menos de uma hora de funcionamento, outra aproximadamente um mês após o início do

experimento (7 horas de operação) e finalmente depois de três meses (55 horas de operação).

O Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (KELLER & KARMELI, 1974) foi calculado mediante a relação:

$$CUD = \frac{q_{25}}{q_{média}} * 100 \quad [4]$$

Em que,

q_{25} : vazão média do menor quartil (L h⁻¹);

$q_{média}$: vazão média dos gotejadores (L h⁻¹).

O Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) foi calculado da seguinte forma:

$$CUE = \left[1 - \left(\frac{s}{q_{média}} \right) \right] * 100 \quad [5]$$

Em que,

s: desvio padrão;

$q_{média}$: vazão média dos gotejadores (L h⁻¹).

Para cada modelo de emissor foram avaliadas 256 unidades, 64 para cada tipo de efluente. Foi calculada a redução da vazão e posteriormente foram totalizados os dados e classificados segundo o grau de entupimento. Como critério para a avaliação do entupimento dos emissores calculou – se a vazão relativa do emissor (q_R) e a porcentagem de redução média da descarga (q_{RED}) segundo a metodologia descrita por Liu & Wang (2009), na qual a vazão relativa está dada pela expressão:

$$q_R = \frac{\bar{q}}{\bar{q}_{ini}} \quad [6]$$

E a redução média da descarga segundo a equação:

$$q_{RED} = 100 * \frac{\bar{q}_{ini} - \bar{q}}{\bar{q}_{ini}} \quad [7]$$

Em que \bar{q} corresponde à vazão média dos emissores para cada medição e \bar{q}_{ini} representa a vazão média ($L h^{-1}$) dos 60 emissores novos operando na pressão nominal. Foi utilizada a metodologia estabelecida por Wu et al. (2008) empregada por Zhou et al. (2015) para avaliar e classificar o efeito da frequência da irrigação no entupimento dos emissores. Para o presente trabalho unicamente foi feita a modificação de considerar como totalmente entupidos aqueles gotejadores cujo volume coletado no teste fosse zero, obtendo os resultados apresentados na Figura 8.

Toda vez que os dados da vazão estejam ajustados a uma distribuição de probabilidade normal pode se considerar a relação entre o CV_f e o CUD. Levando em consideração a média os valores do 25% dos emissores com menor vazão, podendo ser determinada pela equação (PIZARRO, 1995):

$$q_{25} = (1 - 1,27 * CV_f)\bar{q} \quad [8]$$

Desta forma o CUD pode ser calculado mediante a equação:

$$CUD_C = (1 - 1,27CV_f) \quad [9]$$

Em que CUD_C corresponde ao Coeficiente de Uniformidade de distribuição afetado apenas por elementos construtivos dos emissores.

Amostragem e caracterização da água e dos efluentes

Para a avaliação da qualidade da água foram determinadas as propriedades físico-químicas e microbiológicas do esgoto, da água de abastecimento e do efluente dos três sistemas de tratamento utilizado que podem interferir na performance do sistema de gotejamento. Três amostras simples foram coletadas diretamente na saída de cada uma das bombas. Adicionalmente foi determinada a densidade dos diferentes tipos de água utilizados. As características de qualidade da água mais importantes estão apresentadas na Tabela 2. As amostras para as variáveis físicas e químicas foram recolhidas em recipientes plásticos de 250 mL e as que foram coletadas para análise microbiológica, em recipientes plásticos específicos para essa finalidade. Foram conservadas sob baixas temperaturas ($4^{\circ}C - 19^{\circ}C$) e transportadas até o laboratório num período menor a 24 horas.

Tabela 2. Parâmetros físico-químicos dos tipos de água usados no experimento

Parâmetro	Unidades	Água	Tipo de efluente		
			UASB	Digestor + Filtro anaeróbio	Filtro anaeróbio
DQO	mg de O ₂ L ⁻¹	10,80	395,50	384,60	694,90
DBO	mg de O ₂ L ⁻¹	0,90	36,10	47,30	65,00
SST	mg L ⁻¹	22,40	61,63	44,30	114,60
CE	dS m ⁻¹	0,22	2,14	1,99	1,88
pH	-	6,53	6,87	6,88	6,95
Dureza Total	mg de CaCO ₃ L ⁻¹	81,30	221,63	196,25	222,85
Cálcio	mg L ⁻¹	32,10	155,60	109,50	150,70
Sulfatos	mg L ⁻¹	5,19	19,88	89,68	67,70
Sódio	mg L ⁻¹	22,50	99,10	116,60	111,65
Magnésio	mg L ⁻¹	20,60	44,70	62,90	33,80

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Coeficiente de variação do fabricante

No teste preliminar foram definidos o Coeficiente de Variação do fabricante (CVf), Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD), Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE) e as vazões máxima, média e mínima dos emissores novos utilizando água de abastecimento, valores que estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Valores de vazão e coeficientes obtidos na etapa inicial do experimento

Tipo de emissor	Vazão média (L.h ⁻¹)	Vazão máxima (L.h ⁻¹)	Vazão mínima (L.h ⁻¹)	CVf	CUD (%)	CUE (%)
A	1,97	2,09	1,89	0,022	97,33	97,83
B	1,96	2,04	1,89	0,016	97,95	98,41
C	1,99	2,18	1,84	0,041	95,10	95,85
D	2,19	2,39	2,02	0,035	95,25	96,52

A partir dos resultados obtidos observa-se que todos os gotejadores apresentaram vazão média inferior à vazão nominal determinada pelo fabricante,

porém em nenhum dos casos foi menor a 98% deste valor. Segundo a classificação da ASAE, para o CV_f todos os gotejadores podem ser classificados como excelentes pois os valores exibidos estiveram abaixo de 0,05. Segundo Pizarro (1995) estes emissores podem ser classificados como de alta uniformidade.

Considerando que os dados da vazão realizados no teste (Tabela 3) se ajustam a uma distribuição de probabilidade normal e utilizando o valor do CV_f como 0,05 na equação [9] os emissores classificados como excelente teriam uma uniformidade superior a 93,65%, o que corrobora os resultados obtidos no teste para o CUD em todos os tipos de gotejadores. Os valores obtidos para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição Construtivo (CUD_C) foram: tipo **A**: 97,21%; tipo **B**: 97,97%; tipo **C**: 94,79% e tipo **D**: 95,55%, o que confirma que antes de iniciar o experimento o lote de gotejadores novos apresentava condições excelentes e as variações na distribuição de água eram devidas à influência de fatores construtivos e geométricos dos emissores.

Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD)

Na Figura 5 pode-se observar uma tendência de redução dos valores do CUD no tempo para os efluentes de esgoto tratado e uma diminuição inicial menos pronunciada para os gotejadores que trabalharam com água de abastecimento, os quais mostraram maior estabilidade. Ao longo do experimento, o sistema operando com água de abastecimento foi excelente segundo a classificação de Merriam e Keller (1978), pois as percentagens do CUD encontra-se acima de 90%, com exceção do gotejador D no qual o CUD é classificado como bom. Liu e Wang (2009) em experimento realizado em laboratório obtiveram valores entre 90% e 100% para o CUD de gotejadores internos tipo de labirinto de fluxo turbulento e emissores externos autocompensantes, utilizando água e efluentes de esgoto doméstico tratado.

O gotejador tipo D (Figura 5a, 5b, 5c) exibiu o pior desempenho, chegando a valores de CUD próximos a 0% às 55 horas de trabalho usando todos os tipos de efluente. Esses resultados corroboram com os valores obtidos por Pei et al. (2013), nos quais o gotejador de saída lateral dupla apresentou as uniformidades mais baixas dentre os gotejadores autocompensantes, trabalhando com águas residuárias.

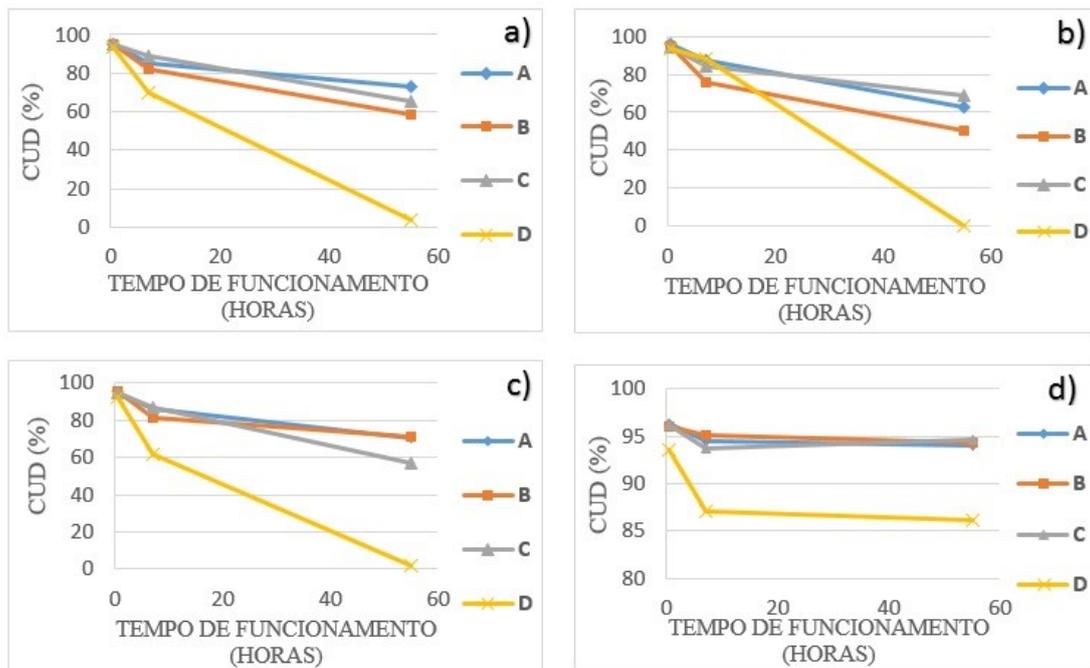


Figura 5. Valores de CUD para os diferentes gotejadores (A,B,C,D) em função do tempo e o tipo de efluente: UASB (a), Filtro digestor em associação com decanto digestor (b), Filtro digestor (c) e água de abastecimento (d).

No presente trabalho, a principal causa de entupimento foi identificada como de origem física, a través de avaliação visual. O processo de obstrução foi favorecido por causa da estreita passagem de entrada ao gotejador tipo D, a qual possui uma grade muito fina, onde os sólidos suspensos retidos foram observados. Segundo a classificação de Bucks et al. (1979) o efluente do filtro digestor apresenta risco severo ao entupimento físico e o efluente do reator UASB apresenta risco moderado, características que prejudicaram com maior intensidade o desempenho do gotejador tipo D.

Silva et al. (2012) em experimento desenvolvido com gotejadores autocompensantes sob condições similares obtiveram valores de CUD de 45,7%, utilizando efluente de esgoto doméstico tratado com filtro digestor. Nessa pesquisa, a vazão nominal dos gotejadores foi de $4,0 \text{ L h}^{-1}$ o que faz que as dimensões de passagem de água sejam maiores em comparação com um gotejador do mesmo modelo, mas de vazão nominal de $2,2 \text{ L h}^{-1}$. A área de filtragem deste modelo é de $3,6 \text{ mm}^2$.

Pode-se observar na Figura 5 valores de CUD superiores a 50% para os gotejadores A, B e C, com 55 horas de operação, trabalhando com todos os efluentes. Além do risco físico de entupimento, comprovado no caso do gotejador D, os valores

dos parâmetros químicos magnésio e CE obtidos nos três tipos de efluentes apresentaram um risco moderado de entupimento (CAPRA & SCICOLONE, 1998), situação que pode ter potenciado o entupimento. Em pesquisa executada sob condições de laboratório Puig-Bargués et al. (2005) avaliando gotejadores de vazão nominal de 1,9 L h⁻¹ trabalhando com efluente de tratamento secundário de esgoto doméstico e usando filtro de discos observaram o CUD acima do 50% até aproximadamente 400 horas de funcionamento, porém, os parâmetros de qualidade de água nesse estudo foram muito melhores, apresentando valores 10 vezes menores para DQO e 33% mais baixos para os sólidos suspensos totais, o que faz que o risco de entupimento devido a esses fatores fosse bem menor.

No teste de uniformidade realizado um mês depois de iniciada a irrigação (0,5 horas de funcionamento), observou-se efeito significativo ($p < 0,01$) para o tipo de emissor (Tabela 4). Não houve efeito significativo para os tipos de água nem a interação dos tratamentos.

Tabela 4. Resumo da análise de variância para o Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) dos emissores utilizando diferentes tipos de água nos três testes realizados

Fonte de variação	GL	Teste 1 (0,55 h)		Teste 2 (7 h)		Teste 3 (55 h)	
		Q M	F	Q M	F	Q M	F
Bloco	3	15,54	7,33**	409,09	3,62 ^{ns}	655,74	1,92 ^{ns}
Água (A)	3	3,98	1,88 ^{ns}	558,21	4,94*	7556,35	22,21**
Resíduo A	9	2,12		113,08		340,43	
Emissor (B)	3	16,71	13,55**	509,92	4,05**	9733,12	45,20**
Água*Emissor	9	0,98	0,79 ^{ns}	174,91	1,39 ^{ns}	881,62	4,09**
Resíduo B	36	1,23		125,90		215,33	
Total	63						

GL: graus de liberdade, QM: quadrado médio, F: valor do teste F calculado, ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade.

A partir do teste executado após 7 horas de funcionamento do sistema de irrigação foi identificado o efeito da água ($p < 0,05$) além do efeito do emissor através do teste. Como pode ser verificado na Tabela 4. Durante todo o experimento o tratamento tipo de gotejador teve influência no desempenho do sistema, avaliado pelo CUD. Como pode ser observado na Tabela 4, o efeito da interação dos dois fatores foi significativo nos resultados do teste final (55 horas).

Segundo os resultados obtidos no primeiro teste, o menor valor de CUD foi observado no gotejador D, diferindo estatisticamente ($p < 0,01$) pelo teste de Tukey

em relação aos outros gotejadores (Tabela 5). Ao início do experimento, sem influência do tipo de água o gotejador externo de saída lateral dupla teve um desempenho significativamente menor do que os outros emissores. Devido à ausência de outros fatores, é possível que a geometria deste gotejador influencie negativamente o seu desempenho, em comparação com outros modelos. A finura da grade na área de filtragem e o escasso comprimento da área de passagem da água em função do seu tamanho pequeno, consideram-se como os fatores geométricos críticos.

Tabela 5. Teste médias do CUD para o tratamento tipo de emissor no teste realizado com 0,5 horas de operação do sistema

Tipo de emissor	Média
A	95,44 a
B	95,28 a
C	95,17 a
D	93,27 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 1,32.

O resultado do teste de médias do CUD da segunda avaliação, para cada fator isolado está apresentado na Tabela 6. A partir dos resultados obtidos nesse teste, aprecia-se que o sistema de irrigação sob o tratamento testemunha (água de abastecimento) apresentou valores significativamente superiores ($p < 0,01$) às médias obtidas para o CUD do sistema, trabalhando com efluentes de esgoto doméstico. O sistema de irrigação montado em campo foi susceptível ao efeito dessa variável com pouco tempo de funcionamento.

Tabela 6. Teste de médias do CUD para os tratamentos tipo de emissor e tipo de água no teste realizado com sete horas de operação do sistema

Tipo de emissor	CUD (%)	Tipo de efluente	CUD (%)
A	88,34 a	UASB	81,65 b
B	83,42 ab	Filtro Digestor e Decanto digestor	83,80 ab
C	88,64 a	Filtro digestor	78,93 b
D	76,57 b	Água de abastecimento	92,58 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 10,69 para tipos de emissores e 11,7 para tipos de água.

Mediante o desdobramento dos tratamentos água e gotejador e o teste de médias observou-se efeito do gotejador tipo D para todos os tipos de efluente às 55

horas, o qual está resumido na Tabela 7. A interação dos tratamentos teve maior efeito nas médias do CUD na combinação dos gotejadores A e D com os efluentes. O gotejador tipo A utilizando os efluentes do UASB e do Filtro digestor teve melhor desempenho que o emissor tipo D trabalhando com os três tipos de efluente.

Tabela 7. Teste de médias para o CUD da interação dos emissores com os tipos de água no teste realizado com 55 horas de operação do sistema

Tipo de emissor	Tipo de efluente doméstico			
	UASB	Filtro Digestor + Decanto Digestor	Filtro Digestor	Água
A	72,72 aA	62,95 aB	70,29 aA	93,97 aA
B	58,10 aB	50,61 aB	71,45 aAB	94,36 aA
C	65,33 aAB	68,58 aAB	57,26 aB	94,57 aA
D	3,48 bB	0,00 bB	1,81 bB	86,09 aA

Médias seguidas pela mesma letra (minúscula entre linhas e maiúsculas entre colunas), não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 27,95 para tipos de emissores dentro do mesmo tipo de água e 39,60 para tipos de água dentro do mesmo modelo de emissor.

Não houve diferença significativa do CUD do sistema operando com água de abastecimento para nenhum dos emissores testados. Isto mostra que em condições de campo, trabalhando durante 55 horas (três meses) os fatores climáticos da região não tiveram influência significativa no desempenho do sistema. Porém, ao longo do tempo os valores desta variável para o gotejador tipo D diminuíram em maior proporção do que nos outros emissores.

Coeficiente de Uniformidade Estatístico (CUE)

Na Figura 6 pode-se apreciar que os valores do CUE têm uma evolução de forma análoga aos resultados obtidos para o CUD. Da mesma forma que no trabalho de Silva et al. (2012) o CUE diminuiu ao longo do tempo, mas apresentando valores superiores ao CUD em todos os casos.

A partir da avaliação do CUE após 55 horas, o sistema de irrigação funcionando com os emissores A, B e C é classificado como ruim e com gotejador D como inaceitável para todos os tipos de efluente de esgoto doméstico tratado (Figura 6). Para este último tipo de emissor, os valores obtidos próximos de zero indicam que o desvio padrão dos dados são iguais ou superiores à média das vazões, motivo pelo qual pode-

se afirmar que o emissor autocompensante de saída lateral dupla não é recomendável para seu uso com efluentes domésticos com altos teores de sólidos suspensos.

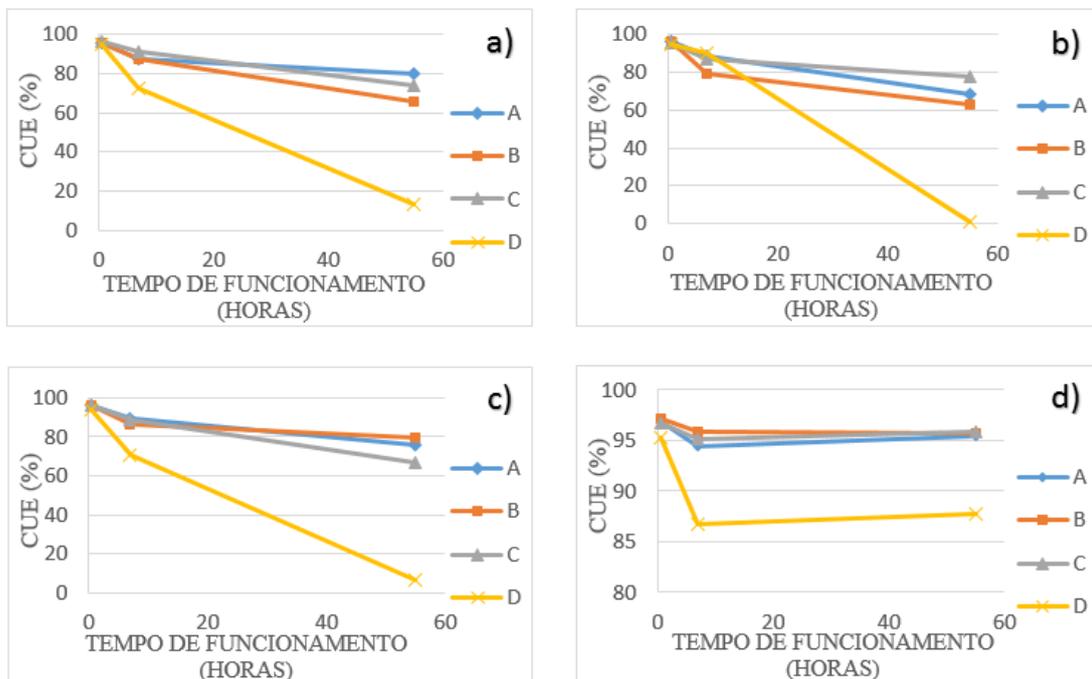


Figura 6. Valores de CUE para os diferentes gotejadores (A,B,C,D) em função do tempo e o tipo de efluente: UASB (a), Filtro digestor em associação com decanto digestor (b), Filtro digestor (c) e água de abastecimento (d).

Comparando os valores do CUE dos efluentes com os obtidos na água de abastecimento, os quais permaneceram superiores a 95% (Figura 6), permitem estabelecer que o uso de esgoto doméstico tratado promove a diminuição do desempenho hidráulico do sistema de irrigação. Conforme o estudo de Capra & Scicolone (2004), comprovou-se que para um mesmo sistema de filtrado (discos 120 mesh) o aumento da matéria orgânica e dos sólidos suspensos totais provoca a redução da média dos coeficientes de uniformidade.

Na Tabela 8 pode-se verificar o efeito do fator tipo de gotejador foi significativo em todos os testes realizados. O tipo de água teve influência na performance do sistema de irrigação avaliado pelo CUE a partir do segundo teste e a interação foi significativa apenas para o teste executado com 55 horas de operação, resultados análogos aos obtidos quando o CUD foi utilizado para avaliar o sistema. Isto indica que no sistema de irrigação utilizado no experimento os dois coeficientes tiveram uma resposta parecida ao efeito dos tratamentos.

Tabela 8. Resumo da análise de variância para o Coeficiente de Uniformidade Estatística (CUE) dos emissores utilizando diferentes tipos de água nos três testes realizados

Fonte de variação	GL	Teste 1 (0,55 h)		Teste 2 (7 h)		Teste 3 (55 h)	
		Q M	F	Q M	F	Q M	F
Bloco	3	12,01	7,58**	368,11	4,92*	242,12	1,04 ^{ns}
Água (A)	3	2,52	1,59 ^{ns}	289,55	3,87*	5858,79	25,17**
Resíduo A	9	1,59		74,84		232,79	
Emissor (B)	3	8,22	9,57**	372,94	4,62**	10421,88	100,46**
Água*Emissor	9	0,52	0,61 ^{ns}	126,19	1,56 ^{ns}	970,15	9,35**
Resíduo B	36	0,86		80,80		103,74	
Total	63						

GL: grau de liberdade, QM: quadrado médio, F: valor do teste F calculado, ns: não significativo; * significativo a 5% de probabilidade, ** significativo a 1% de probabilidade.

Com base nos resultados da análise de variância foi feito o teste de médias para o CUD calculado no primeiro teste (0,5) para o efeito isolado do fator emissor. Os resultados do teste podem-se observar na Tabela 9.

Tabela 9. Teste médias do CUD para o tratamento tipo de emissor no teste realizado com 0,5 horas de operação do sistema.

Tipo de emissor	Média
A	96,29 a
B	96,27 a
C	96,21 a
D	94,83 b

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 1,10.

De acordo com os resultados obtidos, o menor valor de CUE foi observado no gotejador D, diferindo estatisticamente ($p < 0,01$) pelo teste de Tukey em relação aos outros gotejadores como pode se observar na Tabela 9. Devido à resposta similar entre ambos coeficientes, considerou-se que a geometria do emissor gotejador prejudicou seu desempenho, em comparação com os outros tipos avaliados.

Os testes de médias para avaliar o efeito dos tratamentos isolados na segunda avaliação do sistema e desdobramentos de ambos fatores foram realizados, dada a significância do efeito da água e da interação entre os fatores para o segundo e terceiro teste respectivamente. O desempenho do sistema de irrigação esteve afetado pela qualidade do tipo de água utilizada (Tabela 10). O tratamento testemunha (água de abastecimento) apresentou valores médios do CUE superiores ($p < 0,05$) às médias obtidas para o CUE obtido com efluentes de esgoto tratado.

Tabela 10. Teste de médias do CUE para os tratamentos tipo de emissor e tipo de água no teste realizado com 7 horas de operação do sistema.

Tipo de emissor	CUE (%)	Tipo de efluente	CUE (%)
A	89,98 a	UASB	84,44 b
B	87,22 ab	Filtro Digestor e decanto digestor	86,21 b
C	90,29 a	Filtro digestor	83,71 b
D	79,91 b	Água de abastecimento	93,03 a

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 8,56 para tipos de emissores e 9,56 para tipos de água.

Observou-se que o gotejador tipo D apresentou médias menores do CUE usando todos os tipos de efluente em comparação com os gotejadores A e C ao nível de significância de 0,01 (Tabela 11).

Às 55 horas, a interação dos tratamentos teve efeito significativo nas médias do CUE na combinação dos gotejadores A e D com os três tipos de efluentes. Porém, não houve diferença significativa entre as médias dos emissores quando trabalhando com o tratamento testemunha. O gotejador tipo A utilizando os efluentes do UASB e do Filtro digestor teve melhor desempenho que o emissor tipo D trabalhando com os mesmos tipos de efluente. Não houve diferença significativa com o uso do gotejador não autocompensante usando nenhum dos tipos de efluente doméstico. Pei et al (2013), estudaram o desempenho de quatro tipos diferentes de gotejadores autocompensantes e observaram que o gotejador interno autocompensante de labirinto apresentou os melhores resultados de uniformidade e o gotejador externo de saída lateral dupla se desempenhou de forma menos adequada em comparação com os outros três tipos de gotejadores autocompensantes.

Tabela 11. Teste de médias para o CUE da interação dos emissores com os tipos de água no teste realizado com 55 horas de operação do sistema.

Tipo de emissor	Tipo de efluente doméstico			
	UASB	Filtro Digestor + Decanto Digestor	Filtro Digestor	Água
A	80,09 aA	68,45 aA	76,06 aA	95,40 aA
B	65,40 aB	62,78 aB	79,36 aA	95,71 aA
C	73,43 aAB	77,78 aAB	66,98 aB	95,92 aA
D	13,10 bB	1,01 bB	6,14 bB	87,77 aA

Médias seguidas pela mesma letra (minúscula entre linhas e maiúsculas entre colunas), não diferem entre si, pelo teste Tukey a 1% de probabilidade. D.M.S.: 19,40 para tipos de emissores dentro do mesmo tipo de água e 27,76 para tipos de água dentro do mesmo modelo de emissor.

Vazão média

Nos gráficos da Figura 7 pode-se apreciar a variação da vazão média dos diferentes emissores utilizados no experimento, trabalhando com os quatro tipos de água. Para o gotejador tipo B (não autocompensante) e tipo D (externo autocompensante de saída lateral dupla) o efeito dos três tipos de efluente foi redução da vazão média. Essa diminuição foi aproximadamente 50% no emissor tipo D para todos os tipos de efluente. O gotejador tipo B teve redução de 25% da vazão média quando esteve funcionando com o efluente do filtro digestor associado com decanto digestor.

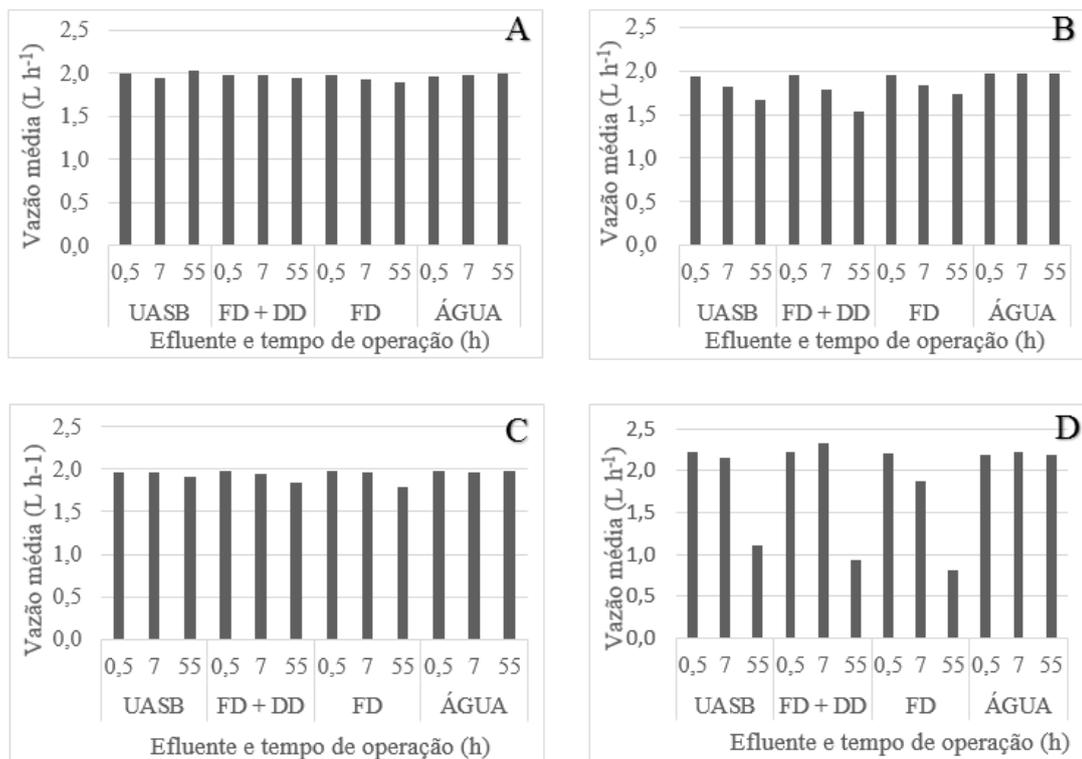


Figura. 7. Variação da vazão média dos gotejadores A, B, C e D para cada um dos tipos de água utilizada e tempo de operação.

A queda na vazão nos gotejadores A e C observada na Figura 7 foi menor que a determinada por Batista et al. (2014) a qual variou de 7% até 58% para gotejadores não autocompensantes após 160 horas de funcionamento trabalhando com diferentes combinações de água de abastecimento com água residuária da suinocultura. Para o gotejador autocompensante a diminuição esteve na faixa de 8% até 33%. Em termos de vazão média, estes gotejadores autocompensantes mantiveram-se pouco

prejudicados pelas características dos efluentes, especialmente do UASB e o filtro digestor associado a decanto digestor. Isto possivelmente foi causado pela sua natureza autocompensante e sua ampla faixa de operação, que permite manter a vazão nominal com uma pressão mínima de 4,0 mca no caso do gotejador tipo A e de 5,0 mca para o gotejador C.

Em experimento desenvolvido em laboratório Rowan et al. (2013) compararam três tipos de gotejadores especialmente desenvolvidos para trabalhar com água residuária e um emissor convencional para uso na agricultura e jardinagem. Após um ano e 243 horas de funcionamento identificaram queda máxima de 63% na vazão dos gotejadores do tipo convencional trabalhando com efluente de esgoto doméstico tratado com tanque séptico, porém, a média da redução nesses emissores foi de 16,3% para esse tratamento. Incluindo os gotejadores que funcionaram com efluente de fossa séptica em associação com filtro de areia a diminuição foi de 9,5%, ambos valores menores aos resultados apresentados na Figura 7. Os pesquisadores não determinaram redução significativa na vazão dos gotejadores desenhados para trabalhar com água residuária tratada.

Após 48 horas de experimento Vale et al. (2013), identificaram reduções na vazão de gotejadores não autocompensantes com vazão nominal de $1,6 \text{ L h}^{-1}$, de 34% utilizando somente efluente primário, 25% até 77% com diferentes combinações de esgoto doméstico primário e água e 9% para os emissores que funcionaram apenas com água de abastecimento valores maiores aos obtidos pelo emissor tipo B utilizado no presente estudo, destacando que não teve diminuição da vazão média para o tratamento água (Figura 7).

Observa-se também na Figura 7 que não houve diminuição na vazão média nos emissores quando funcionaram com água de abastecimento. O uso do efluente de filtro digestor em associação com decanto digestor promoveu queda de 25% da vazão média no gotejador tipo B, a maior diminuição identificada entre os gotejadores A B e C. Esta porcentagem foi maior do que a observada por Li et al. (2009) em experimento desenvolvido em campo, experimento no qual teve redução de 26% da vazão média com a aplicação de efluente doméstico tratado em comparação com a utilização de água subterrânea.

Entupimento relativo dos emissores

Na Figura 8 pode-se verificar a elevada percentagem de emissores do tipo D totalmente entupidos, usando todos os tipos de efluente doméstico tratado. Observa-se também que para os gotejadores dos tipos A, B e C utilizando água de abastecimento unicamente foi observado entupimento baixo, em torno de 10% das unidades, o que quer dizer que 90% dos gotejadores tiveram uma redução menor ao 5% e o resto entre 5% e 20%.

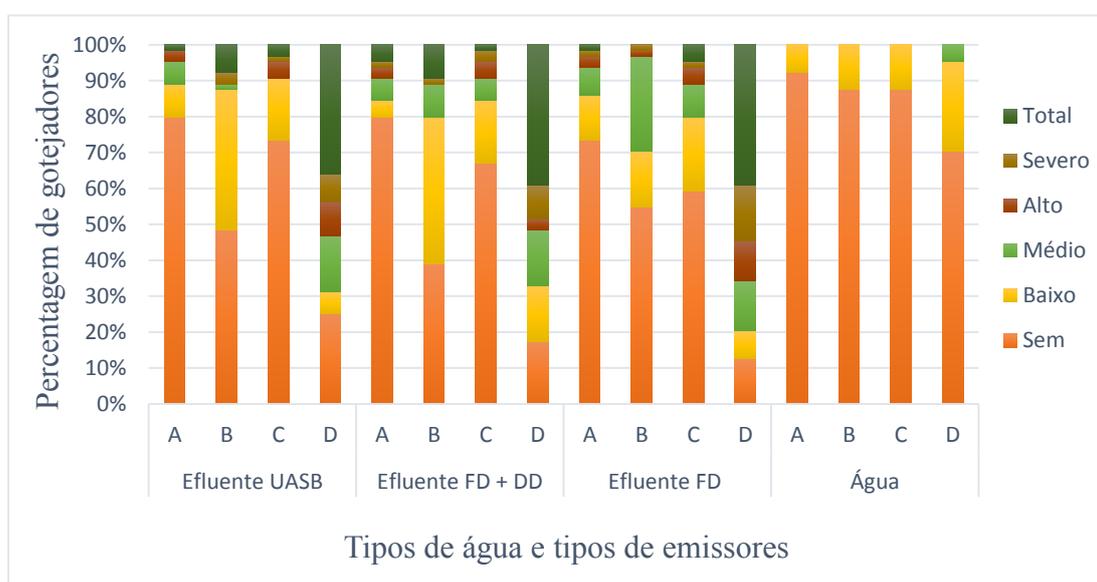


Figura 8. Distribuição dos diferentes graus de entupimento para as combinações de efluentes e gotejadores após 55 horas de experimento.

A percentagem de 70% de emissores não entupidos observada no gotejador D (Figura 8), indica que as características da água de abastecimento utilizada representam um risco de entupimento para este gotejador. Li et al. (2009) observaram que gotejador interno autocompensante de labirinto apresentou 52% de gotejadores entupidos após 82 dias de funcionamento, aplicando efluente secundário durante 12 horas por dia.

Zhou et al. (2015) observaram que a maior percentagem de emissores com redução na vazão média inferior a 5% esteve concentrada no sistema de irrigação no qual foi aplicado efluente de esgoto doméstico tratado com sistema cíclico de lodos ativados a cada 16 dias. Isto indica que o grau de entupimento dos gotejadores

aumenta quando a frequência da irrigação é alta, como a utilizada no presente estudo. Utilizando a mesma frequência de irrigação (2 dias) os autores obtiveram os mais baixos resultados do experimento com valores de CUD e CV de 31,97% e 30,98% , respectivamente após 540 horas de trabalho.

Coeficiente de Variação da vazão (CVq)

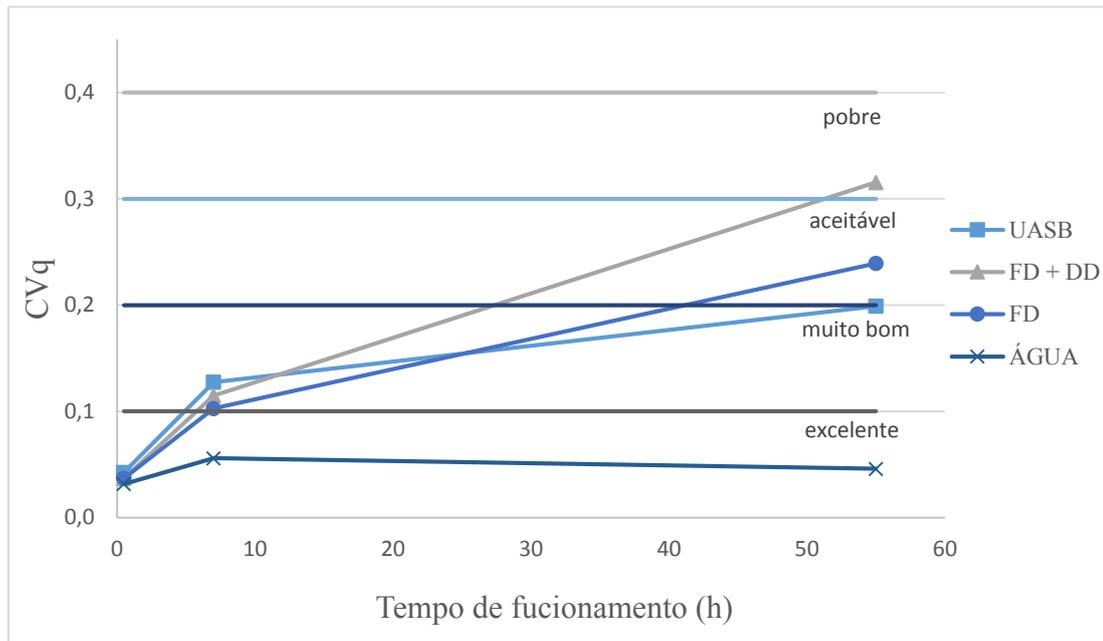


Figura 9. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo A em função do tempo de funcionamento para cada tipo de água.

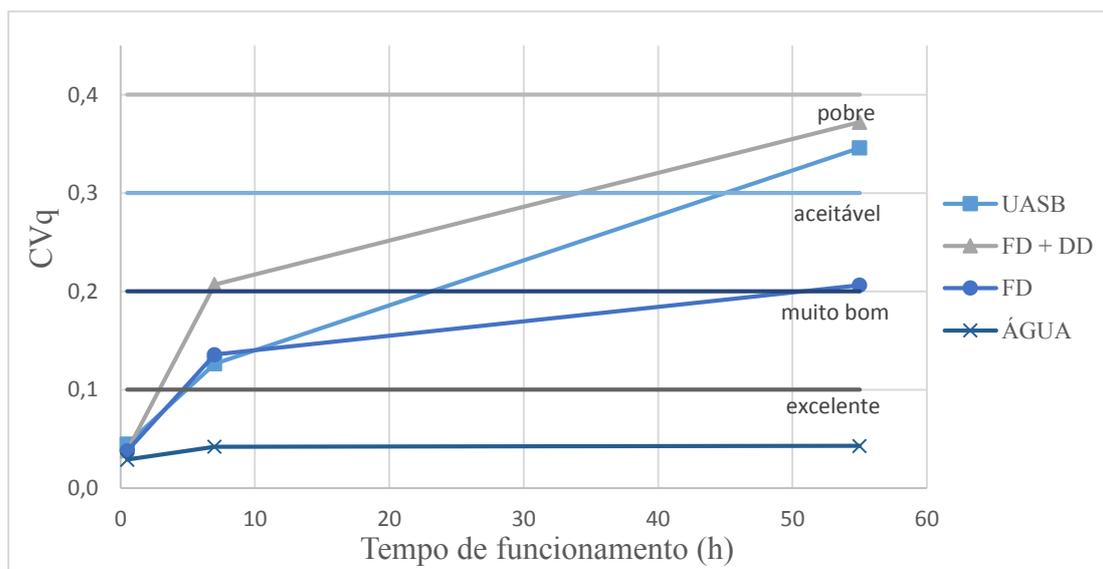


Figura 10. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo B em função do tempo de funcionamento para cada tipo de água.

O CVq foi calculado para todos os tipos de emissores como a divisão do desvio padrão pela média dos valores das vazões medidas em cada um dos testes com cada um dos tipos de água utilizada. A classificação apresentada nas Figuras 9, 10, 11 e 12 foi feita de acordo com Bralts & Kesner (1983) na qual uma variação menor a 0,10 corresponde a um sistema de irrigação excelente e variações maiores de 0,40 significam que o desempenho do sistema é inaceitável.

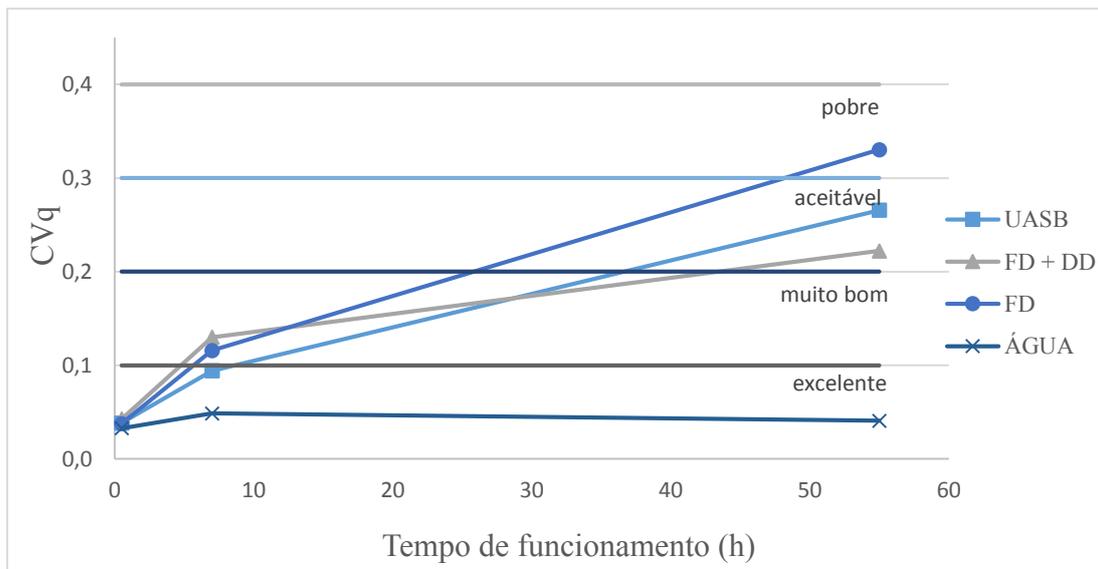


Figura 11. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo C em função do tempo de funcionamento para cada tipo de água.

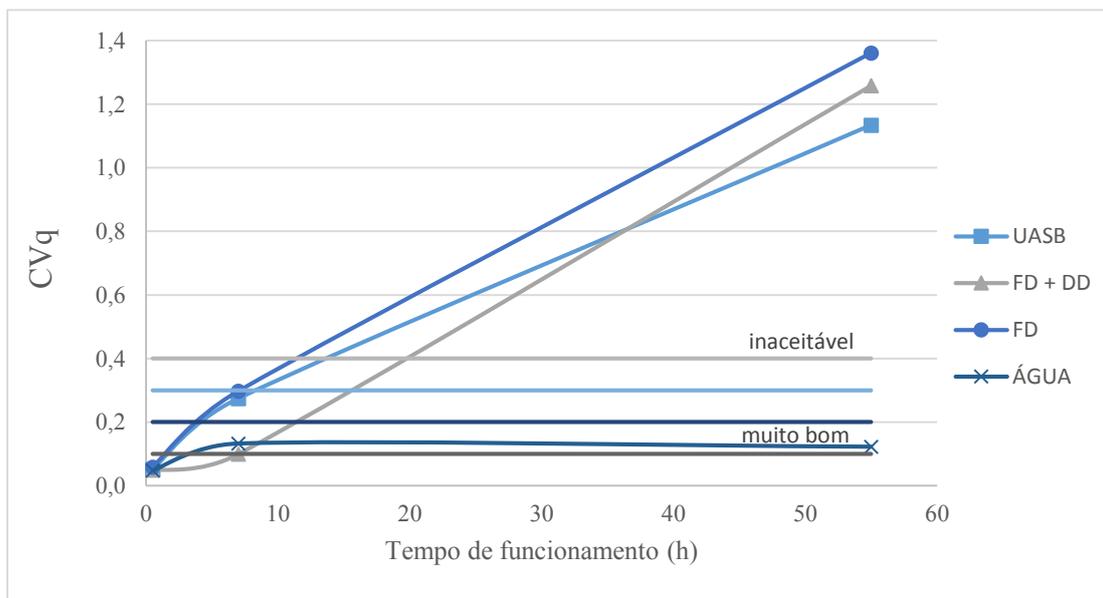


Figura 12. Coeficiente de Variação da vazão do gotejador tipo D em função do tempo de funcionamento para cada tipo de água.

Puig-Bargués et al. (2005) em experimento desenvolvido em laboratório observaram que o CVq de emissores não autocompensantes de labirinto atingiu valores superiores a 0,30 a partir de 317 horas de funcionamento com efluente de tratamento secundário de esgoto doméstico com sistema de filtração de discos de 130 μm , contrastando com as 538 horas requeridas para o mesmo tipo de efluente utilizando sistema de filtração de tela. O efluente terciário obtido após tratamento de filtro de areia e desinfecção ultravioleta manteve seu CVq excelente durante as 750 horas do experimento, o que confirma a importância de tratamento terciário ou específico para a remoção de alguns componentes do esgoto doméstico. O tratamento utilizado garantiu níveis de sólidos suspensos totais não superiores a 5,25 mg L^{-1} e a luz ultravioleta resultou um efetivo tratamento para diminuir a população microbiana, reduzindo desta forma os riscos de entupimento físico e biológico, que têm sido identificados como os maiores para o uso de efluentes de esgoto doméstico tratado.

No presente trabalho a condição de CVq excelente somente foi satisfeita pelos emissores A, B e C com a utilização de água de abastecimento (Figuras 9 10 e 11). O gotejador D obteve um CVq classificado como bom, após 55 horas de funcionamento com água. Em concordância com os resultados de Puig-Bargués et al. (2005) para efluente secundário o CVq aumentou progressivamente ao longo do tempo em todos os gotejadores quando trabalhando com água residuária tratada. Até o momento da última avaliação os gotejadores A, B e C não aumentaram a variação na sua vazão ao ponto de ser classificados como inaceitáveis.

Avaliando apenas este indicador da performance do sistema baseado na média das vazões e seu correspondente desvio padrão observa-se que os gotejadores responderam de forma diferente dependendo do tipo de efluente usado. Assim o emissor tipo A teve melhor desempenho trabalhando com efluentes do UASB e filtro digestor e o CVq do tipo B foi aceitável quando funcionando com o efluente do filtro digestor. O gotejador tipo C teve a melhor resposta usando o efluente do filtro digestor em associação com decanto digestor. Os resultados obtidos na avaliação do gotejador D apresentaram resultados inaceitáveis para seu uso com todos efluentes domésticos.

CONCLUSÕES

Todos os gotejadores testados obtiveram uma condição excelente de acordo com os valores calculados para o Coeficiente de Variação do fabricante.

A combinação do gotejador tipo D com o uso de efluentes domésticos proporcionou os piores resultados no desempenho do sistema.

Na condição de trabalho em campo utilizando efluentes domésticos o uso do emissor não autocompensante não comprometeu o desempenho do sistema.

O uso de água de abastecimento não promoveu redução na vazão média dos emissores.

O teor de sólidos suspensos totais e propriedades químicas dos efluentes foram determinadas como as causas principais do entupimento.

A utilização de efluentes de esgoto doméstico tratado causou o entupimento total de mais do 30% dos gotejadores autocompensantes de saída lateral dupla.

O emprego de efluentes domésticos ocasionou redução no Coeficiente de Variação da vazão em comparação com o uso de água.

O emissor autocompensante de saída lateral dupla não é recomendável para seu uso com efluentes domésticos com altos teores de sólidos suspensos.

Para os efluentes do reator UASB e filtro digestor em associação com decanto digestor, a membrana autocompensante, labirinto e faixa de pressão de trabalho dos emissores autocompensantes interno e externo de saída superior favorecem seu uso mantendo a vazão média.

Para o efluente do filtro digestor, a maior área de filtração e profundidade da passagem de água do emissor interno não autocompensante diminuem o entupimento por causas físicas.

REFERÊNCIAS

- ALLEN, R. G.; PEREIRA, R. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.** Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Food and Agricultural Organization (FAO), Roma, Itália, 2006. 323 p.
- 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, n. 1, p.18-22, 2010.
- 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. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.6, p. 1283-1295, 2014.
- BRALTS, V.F.; KESNER, D. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of ASAE**, v.26, n.5, p. 1369 – 1374, 1983.
- BRITO, R.A.L.; ANDRADE, C.L.T. Qualidade da água na agricultura e no ambiente. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v.31, n. 259, p. 50 – 57, 2010.
- BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v.2, n. 2, p.149-162, 1979.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.70, n. 4, p. 355-365, 1998.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Emitter and filter tests for wastewater reuse by drip irrigation. **Agricultural Water Management**, v. 68, n. 2, p. 135 – 149, 2004.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal of Cleaner Production**, v. 15, n. 16, p 1529 – 1534, 2007.
- CARDOSO, G. G. G.; KLAR, A. E. Índice geométrico e perda de carga localizada em conexões de emissores “online”. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.34, n.6, p. 1114-1127, 2014.

COMISSION INTERNATIONALE DU GENIE RURAL – CIGR. **Water, environment and agriculture: challenges for sustainable development.** First Inter-Regional Conference on Land and Water Challenges. Bari, Itália, 2013.

DANTAS R.M.L. **Hidroponia utilizando águas salobras nos cultivos de agrião e couve chinesa.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, PE, 2012.

DANTAS, D.C.; SILVA, E.F.F.; DE MELO, R.F.; DANTAS, M.S.M.; DA SILVA, G.F.; SILVA, M.M. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente doméstico. **Irriga**, Botucatu, Edição especial 01, p 179 – 189, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION– FAO. **Descubrir el potencial del agua para la agricultura.** Roma, Itália: FAO, 2003, 72 p.

KELLER, J.; BLIESNER R.D. **Sprinkle and trickle irrigation.** New York, U.S.A, Van Nostrand Reinhold, 1990, 652 p.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transactions of the ASAE**, v. 17, n. 4, Michigan, p. 678 – 684, 1974.

LI, J.; CHEN, L.; LI, Y. Assessing emitter clogging in drip irrigation system with sewage effluent. **ASABE International Meeting**, ASABE Paper No. 095827, 2009.

LIU, H.; WANG, G. Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent, **Agricultural Water Management**, v. 96, n. 5, p. 745 – 756, 2009.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management.** Logan, Utah, terceira edição, Utah State University, 1978, 271 p.

PEI, Y.; LI, Y.; LIU, Y.; ZHOU, B.; SHI, Z.; JIANG, Y. Eight emitters clogging characteristics and its suitability under on-site reclaimed water drip irrigation. **Irrigation Science**, n. 32, v. 2, p. 141 – 157, 2013.

PIZARRO, C.F. **Riegos localizados de alta frecuencia**, Bilbao, Espanha: Terceira edição Ediciones Mundi-Prensa, 1995, 511 pp.

PUIG – BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents, **Agricultural Water Management**, n 77, p. 249 – 262, 2005.

- ROWAN, M.; MANCL, K.M.; TUOVINEN, O.H. Evaluation of drip irrigation emitters distributing primary and secondary wastewater effluents. **Irrigation & Drainage Systems Engineering**, n. 2, v. 3, DOI: 10.4172/2168-9768.1000111, 2013.
- SILVA, L.P.; SILVA M.M.; CORREA, M.M.; SOUZA, F.C.D.; SILVA, E.F.F. Desempenho de gotejadores autocompensantes com diferentes efluentes de esgoto doméstico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, n. 5, Campina Grande, PB, p. 480 – 486, 2012.
- VALE, H.S.M.; ARRUDA, L.E.V.; COSTA, D.O.; COSTA, F.G.B.; BATISTA, R.O. Potencial de entupimento de um sistema de irrigação por gotejamento operando com esgoto doméstico tratado. **Water Resources and Irrigation Management**, v. 2, n. 1, Cruz das Almas, BA, p. 63 – 70, 2013.
- WU, X.B.; WU, W.Y.; LIU, H.L.; HAO, Z.Y.; MA, Z.J. Experimental study on anti-clogging performance of emitters for reclaimed wastewater irrigation. **Transactions of CSAE** v. 24, n. 5, p. 61 – 64, 2008.
- ZHOU, B.; YUNKAI, L.; LIU, Y.; XU, F.; PEI, Y.; WANG, Z. Effect of drip irrigation frequency on emitter clogging using reclaimed water. **Irrigation Science**, v. 3, n. 33, p 221 - 234, 2015.

**CAPÍTULO 3: CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO
COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO DA
IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO**

CONTROLE ESTATÍSTICO DE PROCESSO COMO FERRAMENTA NO MONITORAMENTO DA IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO

RESUMO

A irrigação por gotejamento é o sistema que promove o uso mais eficiente da água na agricultura, aceitando também utilização de água de qualidade inferior, como a água residuária tratada, fato que inclui mais fatores a considerar na operação do sistema. Existem diversos coeficientes e metodologias de avaliação do sistema de irrigação. Objetivou-se nesse trabalho avaliar a irrigação como um processo, mediante o monitoramento da vazão média utilizando ferramentas de controle estatístico da qualidade. O delineamento experimental utilizado foi blocos ao acaso utilizando dois tratamentos: tipo de água e tipo de gotejador. Foram escolhidos quatro tipos de gotejadores, dois internos e dois externos, sendo um dos emissores internos não autocompensante. O sistema operou sob condições de campo utilizando três tipos de efluente de esgoto doméstico tratado e água de abastecimento. Foi realizada uma avaliação preliminar do sistema para definir os limites de controle e caracterizar o processo de irrigação em função do desempenho de cada um dos emissores, quando o sistema não estava sob influência de fatores controláveis. Durante a execução do trabalho realizaram-se três testes às 0,5; 7 e 55 horas de trabalho para determinar a vazão de 16 gotejadores em cada linha lateral. As médias dos resultados obtidos foram plotadas nos gráficos de controle com a finalidade de monitorar o processo para cada gotejador. Observou-se que nenhum dos gotejadores atingiu a especificação do fabricante para a vazão média, porém, o sistema esteve sob controle em todos os casos. Os gotejadores externos tiveram maior dispersão entre as medidas de vazão individuais e o gotejador interno não autocompensante apresentou a maior exatidão nessa variável. O processo de irrigação utilizando gotejador externo de saída superior esteve sob controle durante o experimento quando utilizando água de abastecimento. Para o uso de efluentes de esgoto doméstico tratado recomenda-se a primeira avaliação após 7 horas de trabalho e medidas de correção apropriadas para corrigir problemas de entupimento.

Palavras chave: água residuária tratada, controle estatístico da qualidade.

STATISTICAL PROCESS CONTROL AS A TOOL FOR DRIP IRRIGATION MONITORING

ABSTRACT

Drip irrigation systems promote the most efficient water use, allowing the usage of lower quality water, as treated wastewater. This fact includes more factors to count in system operation. There are many coefficients and assessment methodologies for irrigation systems. The aim of this study was to evaluate drip irrigation as a process, monitoring the average discharge by means of statistical quality control tools. Experimental design was randomized blocks with two treatments, water type and kind of emitter. Four kinds of emitters were selected. Two was inline labyrinth type and two online, where one of inline drippers was non-pressure compensating. The system operated under field conditions using three kinds of treated domestic sewage and tap water. Preliminary assessment was executed to define control limits and characterize irrigation process based on each emitter performance when the system was not under the effect of assignable causes. Three tests was performed through the execution of experiment at 0,5; 7 and 55 operation hours to measure the discharge of 16 emitters in each lateral. Average flow values was plotted in control charts to monitoring each dripper irrigation process. None of the drippers reaches the manufacturer's specification for average flow; however, the system was under statistical control in all cases when emitters were new. Online emitters showed more dispersion for individual flow measurements and non-pressure compensating dripper was more accurately for mean discharge. Irrigation process using online upper outlet was under statistical control through all experiment when using tap water. When using treated wastewater effluents for irrigation it is recommended a first system assessment after 7 hours of operation with the application of control and appropriated correcting procedures to diminish clogging issues.

Keywords: treated wastewater, statistical quality control

INTRODUÇÃO

Segundo a FAO (2003) a agricultura é responsável pelo consumo de aproximadamente 70% da água. O aumento nos diferentes usos do recurso hídrico tem provocado o desenvolvimento de normativas e leis cada vez mais rigorosas no Brasil e em outros países (HERNÁNDEZ, 2010) tornando no futuro imprescindível um aumento na eficiência da produção e ampliação na demanda da água para uso na agricultura ou um acréscimo na eficiência agrícola do uso do recurso hídrico (BRITO & ANDRADE, 2010).

Devido a irrigação com água residuária ser praticamente uma necessidade em regiões semiáridas ou com escassez de água de boa qualidade, para seu uso na agricultura resulta muito importante a avaliação de sistemas de irrigação que operam com água de qualidade inferior.

O controle estatístico da qualidade pode ser definido como o conjunto de métodos estatísticos e de engenharia que são usados na medição, controle e melhoria da qualidade (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Os métodos estatísticos têm aplicações na engenharia tais como tolerância dos sistemas e seus componentes, determinação de capacidade dos processos e fornecimento de dados sobre desempenho que podem conduzir a novos e melhores projetos e produtos.

O controle estatístico de processo (CEP) é um conjunto de ferramentas para resolver problemas e alcançar estabilidade e melhorar sua capacidade diminuindo a variabilidade (MONTGOMERY, 2009) e fornece informação importante sobre diversos parâmetros do processo e sua estabilidade ao longo do tempo permitindo aumentar a eficiência (MONTGOMERY & RUNGER, 2003). Uma das ferramentas do CEP são os gráficos de controle propostos pelo Dr. Walter A. Shewhart em 1939. Estes gráficos podem apontar a existência de causas atribuídas ou externas. A partir desse ponto pode ser identificada a origem do problema e tomar ações para eliminar seu efeito (ÁLVARO, 2013).

Os sistemas de irrigação e fertirrigação por gotejamento planejados e operados apropriadamente, possuem maior eficiência na utilização e aplicação da água, situação que justifica a necessidade de investir na pesquisa visando a melhora e maior adaptabilidade desses sistemas na agricultura. Um objetivo fundamental do controle

estatístico da qualidade é detectar com rapidez o efeito de causas não atribuídas ou mudanças no processo, de forma que possam ser realizadas ações corretivas no momento adequado (MONTGOMERY & RUNGER, 2003).

Este conjunto de técnicas tem sido pouco utilizado na avaliação e melhora da irrigação, porém nos últimos cinco anos teve um aumento das pesquisas que utilizam essa ferramenta estatística. Em trabalho desenvolvido no Estado do Paraná, Hernández (2010) fez uma adaptação da metodologia de controle estatístico de processos avaliando dois sistemas novos de irrigação por gotejamento para agricultura familiar utilizando como variáveis a vazão média, Coeficiente de Uniformidade de Distribuição (CUD) e Coeficiente de Variação Total (CVt). Verificou que os sistemas atenderam as especificações providas pelo fabricante tanto mediante avaliações hidráulicas quanto estatísticas.

Silva et al. (2015) executaram um experimento em campo estudando o desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento para cana de açúcar durante o período 2009 – 2011 trabalhando com água de boa qualidade. Concluíram que a vazão e demais variáveis analisadas mantiveram – se dentro dos limites definidos no gráfico de controle devido a que foram feitas práticas adequadas de manejo e operação do sistema como limpeza e substituição das fitas gotejadoras entupidadas ou danificadas.

Outros trabalhos (KLEIN et al., 2012; CORREIA et al., 2014) foram desenvolvidos em condições controladas dentro de casa de vegetação e no campo (ZOCOLER et al., 2015) utilizando água limpa e água com diferentes níveis de salinidade validando a aplicabilidade dos gráficos de controle ao processo de irrigação e comprovando que os equipamentos atingem estatisticamente as especificações de qualidade quando novos ou usados pouco tempo, mesmo com água salina. Porém, esses tipos de avaliações não têm sido realizados no Brasil com esgoto doméstico tratado.

Diante do exposto objetivou-se neste trabalho monitorar e avaliar um sistema por gotejamento composto por quatro tipos de gotejadores que utiliza efluentes de esgoto tratado utilizando as ferramentas do controle estatístico da qualidade.

MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Estação Piloto de Tratamento de Esgoto no Município de Ibimirim, a 330 km de Recife localizado na latitude de 8° 32' 26'' Sul, longitude de 37° 41' 25'' Oeste com altitude média de 401 m, na região semiárida do Estado de Pernambuco. O clima da região é do tipo BSw'h', semiárido muito quente, de acordo com a classificação de Köppen.

Foi instalado um sistema de irrigação por gotejamento com quatro tipos de gotejadores utilizando três tipos de efluente de esgoto doméstico tratado e água de abastecimento. Os efluentes utilizados foram obtidos de três sistemas de tratamento independentes:

- Reator UASB híbrido em associação com uma lagoa de estabilização;
- Digestor anaeróbio associado a um filtro digestor e uma lagoa de estabilização;
- Filtro digestor associado a uma lagoa de estabilização.

Os quatro tipos de gotejadores avaliados foram: **A)** gotejador interno autocompensante de parede média (0,63 mm), **B)** gotejador interno não autocompensante de parede grossa (0,9 mm), **C)** gotejador externo autocompensante de saída superior e, **D)** gotejador externo autocompensante de saída lateral dupla. Para os emissores externos foi utilizada uma mangueira de polietileno de baixa densidade de 16 mm de diâmetro externo e 15,4 mm de diâmetro interno. Todos possuíam uma vazão nominal de 2,0 L h⁻¹, com exceção do gotejador **D** (2,2 L h⁻¹).

A pesquisa foi conduzida utilizando delineamento de blocos casualizados, com quatro blocos de um metro de largura por 18,5 m de comprimento. Em cada bloco foram colocadas quatro parcelas, cada uma com um tratamento de tipo de água diferente. Dentro de cada parcela foram colocadas quatro linhas laterais de 18 m. Cada uma delas possuía 60 gotejadores, com espaçamento entre emissores e entre linhas de 0,3 m. O terreno não tinha declividade no sentido das laterais.

Cada tipo de efluente e a água utilizada no experimento foram armazenados em lagoas específica com capacidade de 9 m³ cada. Foi montado um sistema de irrigação por gotejamento a partir das quatro lagoas. Em cada uma foi colocada uma moto

bomba centrífuga Schneider de 0,5 cv com tubulação de sucção de 32 mm e válvula de pé e crivo. Na saída das bombas colocou-se um filtro de discos de 120 mesh (130 µm). Os fluídos foram conduzidos por tubulação de PVC de 32 mm até os cavaletes construídos em PVC de 25 mm, onde foram inseridos acoples rápidos para manômetro seguidos de registros de gaveta com a finalidade de regular e monitorar a pressão na entrada das linhas derivadas.

Durante a execução das irrigações e as coletas de vazão para os diferentes testes do experimento foi utilizada pressão de serviço entre 10 mca – 10,5 mca para manter a vazão nominal no emissor não autocompensante e para atender também a faixa de pressão de compensação dos emissores autocompensantes.

Para reproduzir o funcionamento de um sistema de irrigação de uma cultura sob condições reais utilizou-se a lâmina correspondente a 100% da evapotranspiração diária calculada para o algodão, utilizando a metodologia de Penman-Monteith (ALLEN et al., 2006), simulando a plantação na área experimental. O turno de rega definido foi de dois dias.

As medidas das vazões para realizar os testes de uniformidade e cálculo dos valores das variáveis foram feitas utilizando-se a metodologia adotada por Merriam e Keller (1978), sendo esta executada da seguinte maneira: coleta durante 15 minutos do volume aplicado pelo primeiro emissor e pelos emissores localizados nas posições múltiplas de quatro, totalizando 16 gotejadores por mangueira. Desta forma foi avaliada a vazão de emissores uniformemente espaçados incluindo os localizados a 1/3, 2/3 e no final da linha, correspondentes aos gotejadores de número 20, 40 e 60.

Para recolher de forma simultânea a água dos gotejadores localizados na mesma posição em todas as mangueiras foram construídas trincheiras de 20 cm de profundidade onde colocaram-se tábuas de madeira sobre as quais foram fixados os recipientes coletores de plástico com capacidade para 1,0 L e 19 g de massa, os quais eram pesados com uma balança eletrônica logo depois da coleta.

O controle estatístico da qualidade foi utilizado como ferramenta para monitorar e avaliar a qualidade e capacidade do sistema de irrigação por gotejamento. Como indicado por Montgomery (2009), todo processo está sujeito a variabilidade natural e é influenciado por fatores ou causas que podem ser casuais ou atribuídas. As causas atribuídas são aquelas que podem ser controladas. Para o processo de irrigação

do experimento foram consideradas como causas atribuídas x_1 : vazão de entrada, x_2 : pressão no sistema, x_3 : diâmetro das linhas laterais e x_4 : tipo de gotejador. Como causas não-controláveis do processo foram definidas v_1 : características e qualidade da água ou efluente, v_2 : entupimento dos emissores, v_3 : temperatura da água, v_4 : temperatura do solo, v_5 : temperatura do ar, v_6 : desgaste dos emissores, e v_7 : expansão do diâmetro interno das mangueiras por efeito do clima. A configuração do processo e a saída esperada correspondem ao diagrama da Figura 1. A variável avaliada para caracterizar o processo de irrigação foi vazão média (\bar{q}).

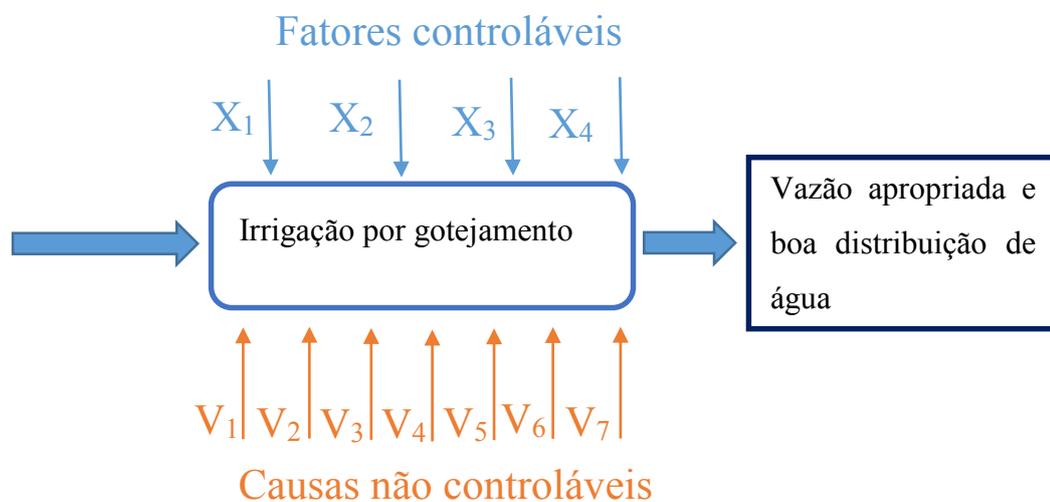


Figura 1. Esquema do processo de irrigação localizada utilizado no experimento.

Para fins de avaliação foram realizadas três coletas de água ao longo do tempo. A primeira no início do experimento quando os gotejadores tinham menos de uma hora de funcionamento, outra aproximadamente um mês após o início do experimento (7 horas de operação) e finalmente depois de três meses (55 horas de operação).

Pelo fato de ser um processo novo em termos de localização e condições experimentais e climatológicas os parâmetros: média (μ) e desvio padrão das médias (σ) para a vazão média eram desconhecidos, portanto foram estimados com base em amostras preliminares, coletadas mediante um teste executado nos 60 emissores de cada uma das 4 linhas laterais que funcionaram com água de abastecimento no bloco mais próximo da bomba. Este teste foi realizado antes do início do experimento quando o processo estava aparentemente sob controle estatístico segundo a recomendação de Montgomery & Runger (2003). Para ter maior representatividade dos dados foram

utilizados também os valores do primeiro teste realizado no sistema funcionando com água de abastecimento e 0,5 hora de operação. Os limites de controle dos gráficos foram calculados, revisados e corrigidos quando necessário.

O tamanho da amostra foi de quatro, isto é, cada amostra esteve composta pela média de quatro medidas individuais. Para a vazão média tiveram-se 17 amostras preliminares. A média da população foi estimada segundo a equação, (MONTGOMERY & RUNGER, 2003):

$$\bar{\bar{X}} = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m \bar{X}_i \quad [2]$$

Na qual \bar{X}_i representa a média amostral para a i -ésima amostra e m é o número de amostras. Assim, o valor de $\bar{\bar{X}}$ foi considerado como o valor para a linha central do gráfico de controle \bar{X} . Utilizando a relação entre a amplitude r das amostras provenientes das medidas individuais e o desvio padrão das médias, os valores para construir o gráfico de controle \bar{X} foram definidos da seguinte forma:

$$LSC = \bar{\bar{X}} + A_2 \bar{r} \quad [3]$$

$$LC = \bar{\bar{X}} \quad [4]$$

$$LIC = \bar{\bar{X}} - A_2 \bar{r} \quad [5]$$

Em que LSC é o limite superior de controle, LC corresponde à linha central e LIC é o limite inferior de controle. A constante A_2 é tabelada em função do tamanho da amostra e \bar{r} representa a média das amplitudes amostrais. Na Tabela 1 encontram-se os valores para os tamanhos amostrais mais frequentes. O valor de d_2 corresponde à média da distribuição da amplitude da amostra dividida pelo desvio padrão.

Tabela 1. Fatores para construir gráficos de controle \bar{X}

Tamanho da amostra “n”	A ₂	d ₂
2	1,88	1,128
3	1,023	1,693
4	0,729	2,059
5	0,557	2,326
6	0,483	2,534

Fonte: Montgomery & Runger (2003).

A razão de capacidade de processo RCP foi calculada segundo a expressão (MONTGOMERY, 2009):

$$RCP_k = \text{mín} \left[\frac{LSE - \bar{X}}{3\hat{\sigma}}, \frac{\bar{X} - LIE}{3\hat{\sigma}} \right] \quad [6]$$

Em que LSE e LIE correspondem aos limites superior e inferior de especificação, o grau de qualidade esperado na saída ou variável do processo e $\hat{\sigma}$ representa o valor da amplitude média amostral dividida pelo fator d₂ (Tabela 1). No caso da vazão os limites foram definidos como +5% e -5% do valor definido pelo fabricante, atendendo uma variação máxima de 10% na vazão dentro de uma unidade operacional de um sistema de irrigação. Na Tabela 2 observam-se os valores mínimos recomendados para este índice.

Tabela 2. Valores mínimos recomendados para razão de capacidade de processo

Tipo de processo	Especificações	
	Ambos lados	Mín. ou Máx.
Existente	1,33	1,25
Novo	1,50	1,45

Fonte: Montgomery (2009).

Com os valores obtidos nos testes foram elaborados gráficos de controle para avaliar a qualidade do processo no tempo para cada tipo de emissor utilizando os quatro tipos de efluente. Também foi comparado o desempenho do sistema para cada tipo de gotejador entre os diferentes tipos de efluente e a água de abastecimento. Para visualizar graficamente a capacidade do processo do sistema de irrigação foram

elaborados diagramas de tolerância, onde foram plotadas as medidas individuais de cada amostra junto com os limites de especificação mencionados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

As médias dos valores da vazão plotados no gráfico da Figura 2 foram utilizadas para calcular os limites de controle para o gotejador tipo A. No diagrama de tolerância da Figura 2 pode-se observar como é o desempenho do processo de irrigação para o gotejador tipo A novo. Considerando uma vazão nominal de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ e limites de especificação baseados numa variação máxima de 10% na vazão média ($\pm 5\%$) aprecia-se que na maioria dos gotejadores avaliados atendem as especificações, mas o processo de irrigação está ocorrendo fora do centro devido a que muitos pontos estão entre os valores da vazão fornecida pelo fabricante para a faixa de pressões de operação (4,0 mca – 30,6 mca) e o limite inferior de especificação de $1,9 \text{ L h}^{-1}$.

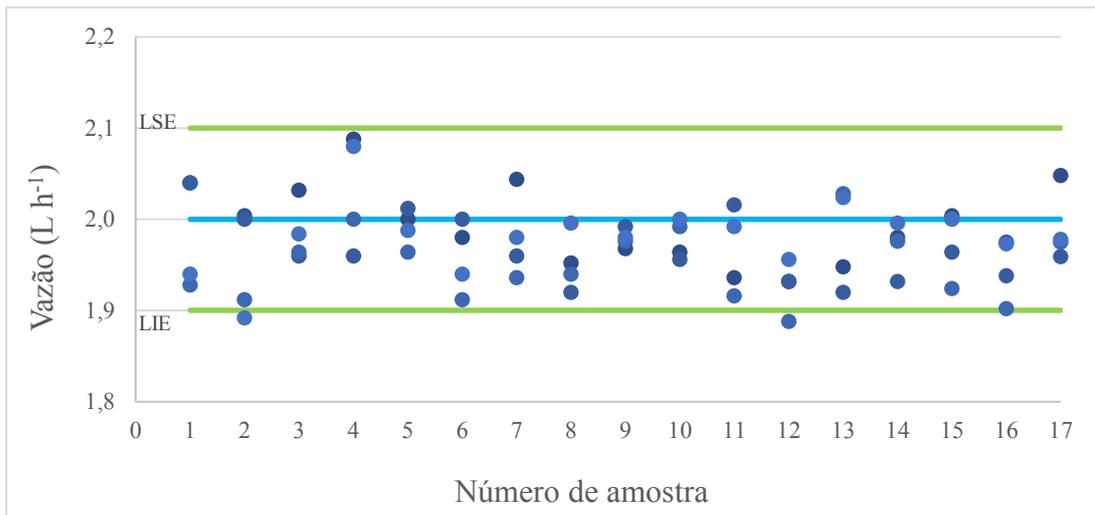


Figura 2. Gráfico de tolerância da vazão do gotejador tipo A para as amostras obtidas no teste preliminar.

De acordo com o catálogo do fabricante, o gotejador B não autocompensante possui vazão de $2,0 \text{ L h}^{-1}$ com pressão de entrada de 10 mca (Figura 3). O processo de irrigação atende as especificações com uma variação menor que nos outros três gotejadores, porém, determinou-se na sua grande maioria valores abaixo do valor da vazão nominal. Os gotejadores C e D apresentaram alta dispersão dos valores medidos no teste preliminar o que explica os valores maiores do CVf calculados para esses emissores. Silva et al. (2012) observaram altos valores do CVf para gotejadores novos do tipo D com vazão média de $4,0 \text{ L h}^{-1}$ em experimento realizado sob condições de campo.

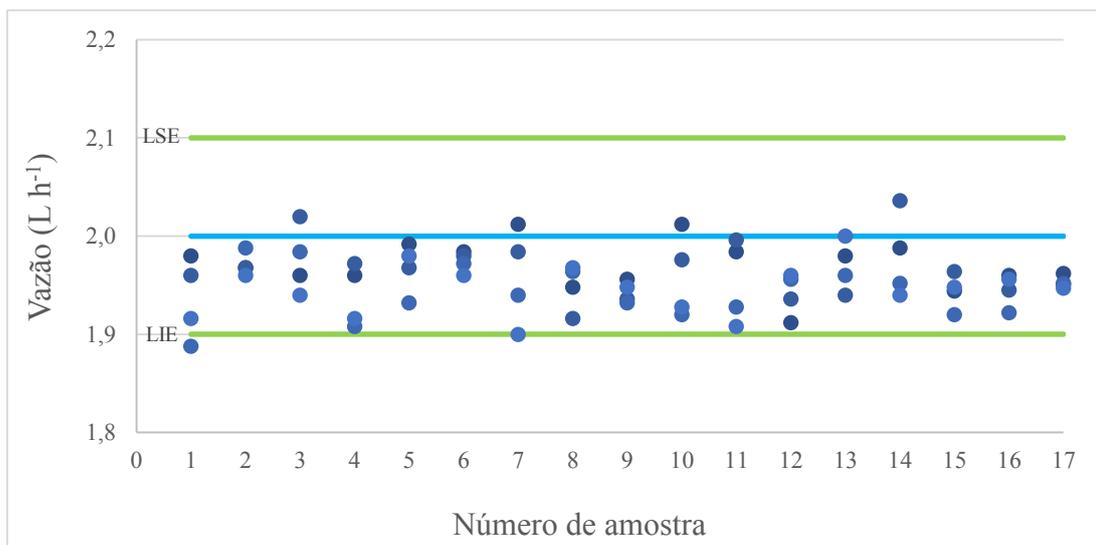


Figura 3. Gráfico de tolerância da vazão do gotejador tipo B para as amostras obtidas no teste preliminar.

O gotejador externo autocompensante de saída superior (tipo C) apresentou maior dispersão dos valores unitários das vazões, porém, a maioria dos pontos ficaram no meio dos dois limites de especificação (Figura 4). Como consequência disso, apresentou uma vazão média de $1,99 \text{ L h}^{-1}$ medida no teste, a mais próxima do valor nominal $2,0 \text{ L h}^{-1}$. Em compensação, em praticamente todas as amostras (cada grupo de quatro pontos alinhados verticalmente) alguns dos gotejadores esteve aplicando água fora dos parâmetros de vazão máxima ou mínima desejados para um sistema de irrigação que operasse com esse emissor. Em geral esse dispositivo aplica água com menor precisão que os emissores A e B, mas é capaz de atingir a vazão média estabelecida pelo fabricante.

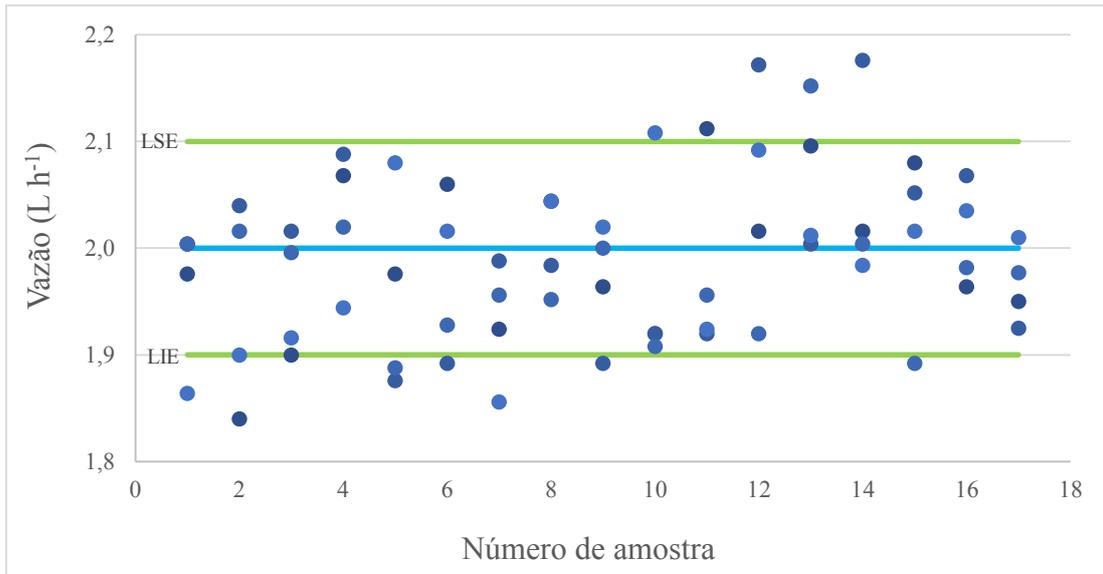


Figura 4. Gráfico de tolerância da vazão do gotejador tipo C para as amostras obtidas no teste preliminar.

No caso do emissor externo autocompensante de saída lateral dupla (Figura 5), a vazão indicada no catálogo do fabricante de $2,3 \text{ L h}^{-1}$, porém, em todos os testes realizados a vazão média não esteve perto desse valor. A partir dos dados obtidos tanto no teste preliminar quanto no primeiro teste com 0,5 horas de operação o valor definido como vazão real do gotejador foi $2,2 \text{ L h}^{-1}$ para a faixa de pressões de operação (8,0 mca – 30,6 mca). De acordo com o valor observado, $2,19 \text{ L h}^{-1}$ o gotejador D quando novo consegue aproximar bem o valor nominal real ($2,2 \text{ L h}^{-1}$), mas a lâmina aplicada por cada emissor é muito variável o que pode ser observado na dispersão dos dados.

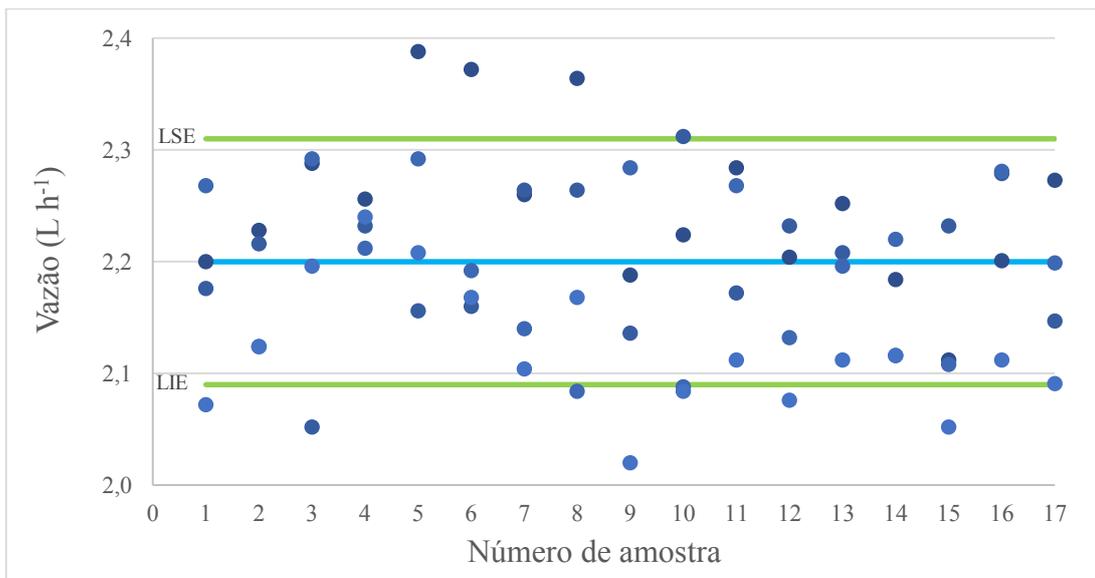


Figura 5. Gráfico de tolerância da vazão do gotejador tipo D para as amostras obtidas no teste preliminar.

Diferentemente do obtido por Hernández (2010), os emissores não atendem completamente as especificações do fabricante, mas, o processo esteve sob controle quando os gotejadores estavam novos e aplicando água de abastecimento.

Nos gráficos da Figura 6 estão representados os resultados obtidos nos testes preliminares para a vazão média dos emissores utilizados. Os limites estão determinados em função dos valores médios e a amplitude das amostras, calculada como a diferença entre o valor máximo e o valor mínimo de cada conjunto de quatro medições empregado para definir cada amostra. Este conjunto de quatro valores corresponde a cada grupo de quatro pontos alinhado de forma vertical nas figuras 2, 3, 4 e 5.

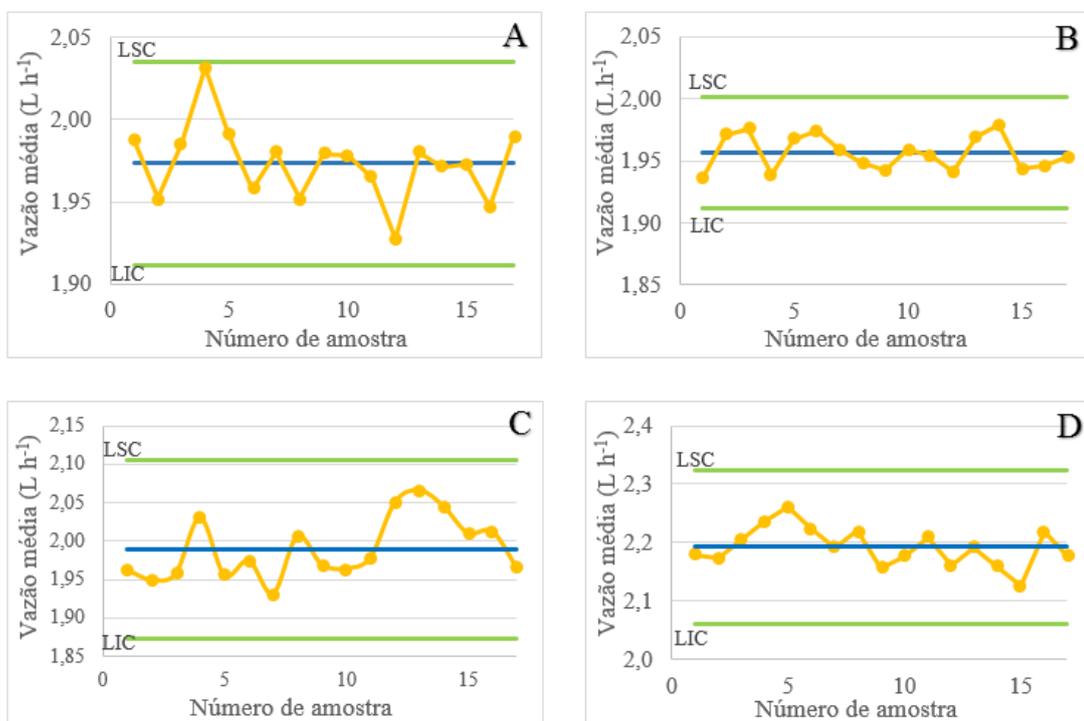


Figura 6. Gráfico de controle de controle \bar{X} para a vazão dos gotejadores A, B, C e D e valor das amostras preliminares realizadas antes do experimento.

Observa-se em todos os casos que as vazões médias apresentam um padrão de distribuição essencialmente aleatório e nenhum dos dados cai fora dos limites de controle. Essas características e o fato de que não existem oito ou mais pontos continuamente crescentes ou decrescentes indicam que, em todos os casos, processo de irrigação está sob controle estatístico, lembrando que o valor das médias está abaixo da vazão nominal. No início do experimento com os gotejadores novos não se tinha causas atribuídas interferindo no processo. Os dados apresentados corroboram os

resultados obtidos por Klein et al. (2012) para um sistema de irrigação por gotejamento novo montado em campo utilizando água limpa.

Tabela 3. Razão de capacidade de processo calculados para irrigação em campo e porcentagem da amplitude da amostra requerida para atender as especificações

Emissor	RCP_k	%
A	0,59	169,49
B	0,63	158,73
C	0,38	263,16
D	0,11	909,09

Os valores obtidos para a razão de capacidade de processo foram menores à unidade para todos os tipos de gotejadores. Estes valores são considerados muito baixos (Tabela 3). Segundo Montgomery & Runger (2003), um processo com valor de $RCP = 1$ a fração não conforme, ou seja, a porcentagem de emissores que não vão atender as especificações de $2,0 \text{ L h}^{-1} \pm 5\%$ será de 0,27% segundo uma distribuição de probabilidade normal. As porcentagens apresentadas na Tabela 3 indicam a porcentagem da largura das especificações que abrange o processo. Por se tratar de processos não centrados (a linha central do gráfico de controle não tem o mesmo valor que a vazão fornecida pelo fabricante) o cálculo tem tendência a dar como resultado valores menores, devido a estes tipos de processos serem mais susceptíveis a produzir inconformidades.

De acordo com os resultados obtidos para os emissores A B C e D, utilizando água de abastecimento, após 55 horas de operação (Figura 7), o processo de irrigação tem pontos fora dos limites de controle em três tipos de gotejadores (A, B e D). Isto quer dizer que podem existir causa atribuídas que afetam de forma negativa a estabilidade do processo e o produto final, a adequada e uniforme aplicação de água. Apenas o gotejador C manteve o processo sobre controle pois devido às características dos dados a exatidão para atingir a média é alta, mas com precisão menor que outros tipos de gotejadores, o que amplia os limites de tolerância. Por ser um processo desenvolvido no esquema de experimento de campo uma possível causa atribuída que não foi considerada no início é a manipulação do sistema de coleta. Também entre as causas não controláveis que podem ter afetado o processo, estão o entupimento e alterações físicas dos emissores e seus componentes, provocadas por fatores climáticos.

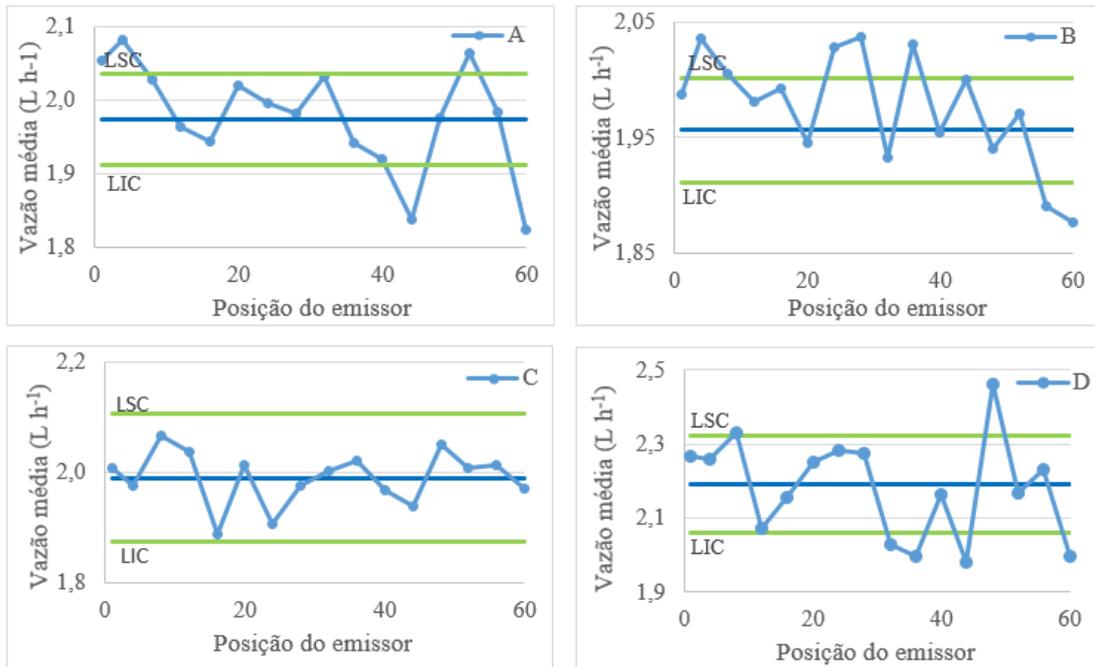


Figura 7. Gráfico de controle \bar{X} para a vazão dos gotejadores A B C e D com uso de água ao final do experimento (55 horas de funcionamento).

Por outro lado, toda vez que a irrigação desenvolvida nesse experimento representa um processo novo, os parâmetros definidos no início devem ser interpretados como parâmetros de estimação, motivo pelo qual alguns autores (MONTGOMERY & RUNGER, 2003; MONTGOMERY, 2009) recomendam plotar os valores de \bar{x} e \bar{r} cada vez que novas amostras estejam disponíveis e rever de forma periódica os limites, especialmente quando forem feitas melhoras no processo. Silva et al. (2015) avaliaram o processo de irrigação em cana de açúcar e encontraram que o processo se desenvolveu dentro dos limites de especificação, atingindo valores adequados de capacidade de processo, mas com o processo correndo acima da vazão média estabelecida pelo fabricante. No gotejador B (Figura 7) observa-se uma redução da vazão média nos gotejadores situados no último terço das linhas laterais. Mesmo não sendo contínua, existe uma tendência que deve ser verificada no campo e com novos testes. A origem desta resposta pode ser a queda da velocidade de fluxo no final da linha e entupimento físico e químico.

Em termos de vazão média, o emissor que teve desempenho mais aceitável com o uso de efluente do filtro digestor foi o B (Figura 8). Durante o primeiro teste quase todas as amostras ficaram dentro dos limites de controle. Ao longo do tempo observa-se uma queda na qualidade do processo que é atribuída à característica da qualidade do efluente que incide no fator não controlável que é o entupimento dos emissores

como o teor de sólidos em suspensão. De acordo com gráfico da Figura 8 pode-se recomendar uma limpeza e revisão do sistema após o primeiro mês de uso (0,5 horas de funcionamento).

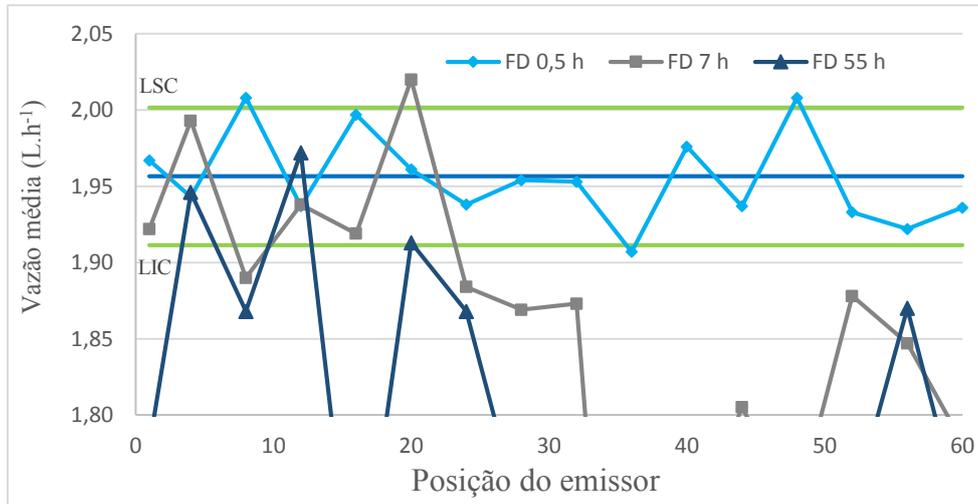


Figura 8. Controle estatístico da irrigação utilizando efluente doméstico tratado com filtro digestor num gotejador interno não autocompensante (Tipo B).

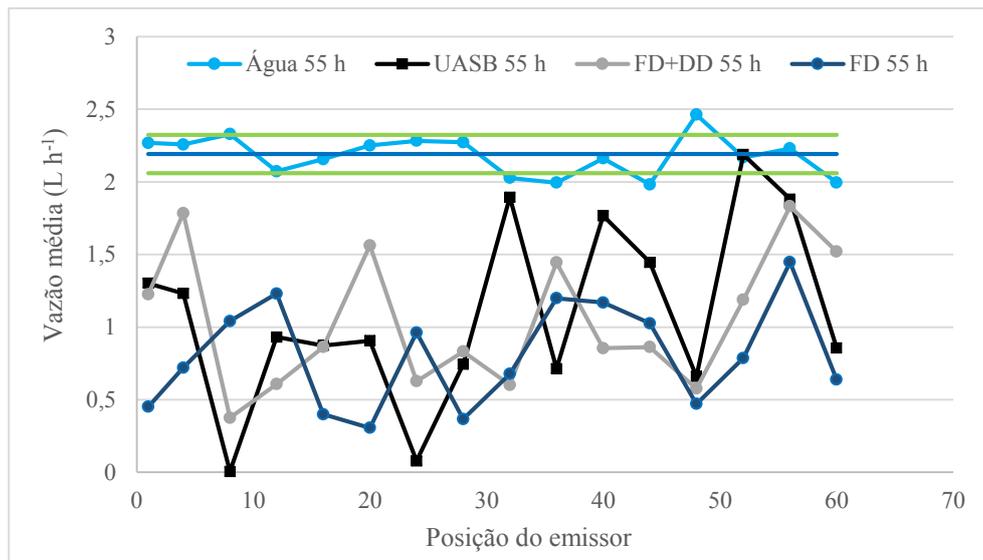


Figura 9. Controle estatístico do processo de irrigação após 55 horas utilizando três efluentes domésticos tratados e água, num gotejador externo autocompensante de saída lateral.

Para exemplificar a influência do efluente no desempenho dos gotejadores, os valores médios da vazão do emissor D utilizando todos tipos de água foram plotados no gráfico de controle da Figura 9. Percebe-se que o processo de irrigação permaneceu praticamente dentro dos limites de controle quando foi usada água, porém, usando efluentes tratados a vazão média permanece totalmente fora desses limites.

CONCLUSÕES

O sistema de irrigação novo montado em campo esteve sob controle estatístico quando funcionando com água limpa para todos os gotejadores.

O gotejador interno não autocompensante apresentou menos dispersão dos valores individuais de vazão em comparação com a média.

Nenhum dos gotejadores atingiu em condições de campo a vazão nominal média estabelecida pelo fabricante.

O gotejador tipo externo autocompensante de saída superior teve melhor aproximação ao valor da vazão nominal e manteve o processo de irrigação sob controle trabalhando com água durante 55 horas.

A qualidade dos efluentes e sua influência no entupimento foi identificada como a principal causa da redução na qualidade do processo de irrigação ao longo do tempo.

REFERÊNCIAS

ALLEN, R. G.; PEREIRA, R. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Evapotranspiración del cultivo. Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos.** Estudio FAO Riego y Drenaje 56. Food and Agricultural Organization (FAO), Roma, Itália, 2006. 323 p.

ÁLVARO, J. A. H. **Sistema de indicadores para la mejora y el control integrado de la calidad de los procesos.** Castelló de la Plana, Espanha: Segunda edição, Universitat Jaume I Publicacions, 2013, 230 p.

BRITO, R. A. L.; ANDRADE, C. L. T. Qualidade da água na agricultura e no ambiente. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte – MG, v.31, n. 259, p. 50 – 57, 2010.

CORREIA, F. G.; MORAIS, G. S.; DA SILVA, P. F.; DE LIMA, A. S.; NETO, J. D. Gráficos de Shewhart no processo de aplicação de água salina em sistema de irrigação por gotejamento. **II INOVAGRI International Meeting**, Fortaleza – CE, 2014.

FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION – FAO. **Descubrir el potencial del agua para la agricultura.** Roma, Itália: FAO, 2003, 72 p.

HERNÁNDEZ, R. H. **Controle estatístico de processo aplicado na uniformidade da irrigação e fertirrigação por gotejamento.** Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel – PR, 2010.

KLEIN, M. R.; SZEKUT, F. D.; REIS, C. F.; BONEMBERG, S. B.; SUSZEK F. L.; VILAS BOAS M. A. Gráficos de Shewhart no processo de aplicação de água de um sistema de irrigação familiar por gotejamento. **IV WINOTEC Workshop Internacional de Inovações Tecnológicas na Irrigação**, Fortaleza – CE, 2012.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm Irrigation System Evaluation: A Guide for Management.** Logan, Utah, terceira edição, Utah State University, 1978, 271 p.

MONTGOMERY, D. C. **Introduction to statistical quality control.** United States: Sexta edição, John Wiley & Sons Inc., 2009, 734 p.

MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros.** Rio de Janeiro: Segunda edição, LTC. 2003, 463 p.

SILVA, S.; DANTAS NETO, J.; TEODORO, I.; SANTOS, M. A. L.; ANDRADE, A. B. A.; CORDÃO, M. A. Qualidade da irrigação por gotejamento em cultivos consecutivos de cana de açúcar. *Agropecuária Científica no Semiárido*, v. 11, n. 2, p. 01 – 08, 2015.

SILVA, P. F.; LIMA, S. C.; DANTAS NETO, J.; GOMES, R. C. B. ALVES, A. S. Statistical process control in self-compensating drippers XFS subsurface dripline using saline water. **II INOVAGRI International Meeting**, Fortaleza – CE, 2014.

ZOCOLER, J. L.; RIBEIRO, P. H. P.; DA SILVA, N. F.; CUNHA, F. N.; TEXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L. Desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água salina. **Irriga**, Botucatu – SP, Edição especial, p. 234 – 247, 2015.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A utilização de efluentes domésticos tratados no semiárido requer de pesquisas voltadas à avaliação de outros tipos de emissores, gotejadores com vazões baixas ($> 2 \text{ L h}^{-1}$) e alternativas de manejo e limpeza de baixo custo, para aumentar sua vida útil.

As condições geradas pela seca dos últimos anos no município de Ibimirim provocaram que atualmente a principal atividade agrícola seja a cultura do milho. Recomenda-se estudos no uso de efluentes domésticos para a irrigação desta cultura, com a finalidade de verificar fatores como aporte de nutrientes, salinização do solo, contaminação microbiológica e resposta da população.

Não se recomenda a utilização de gotejadores autocompensantes de saída lateral dupla com vazões baixas devido a que seu tamanho pequeno e reduzidas dimensões na passagem de água comprometem seu desempenho usando efluentes de esgoto doméstico, especialmente com elevados teores de sólidos suspensos.

APÊNDICE A. Emissores utilizados

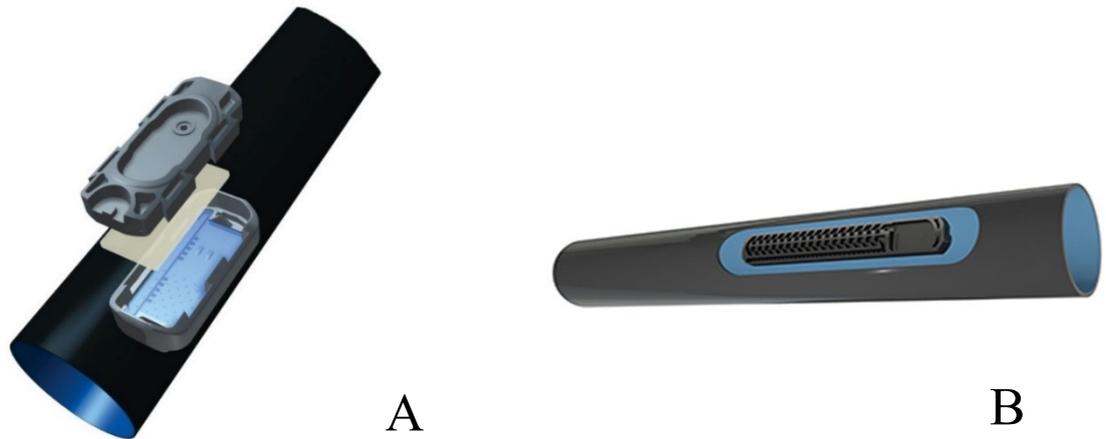


Figura 1. Gotejadores internos utilizados no experimento. A: autocompensante, B: não autocompensante.

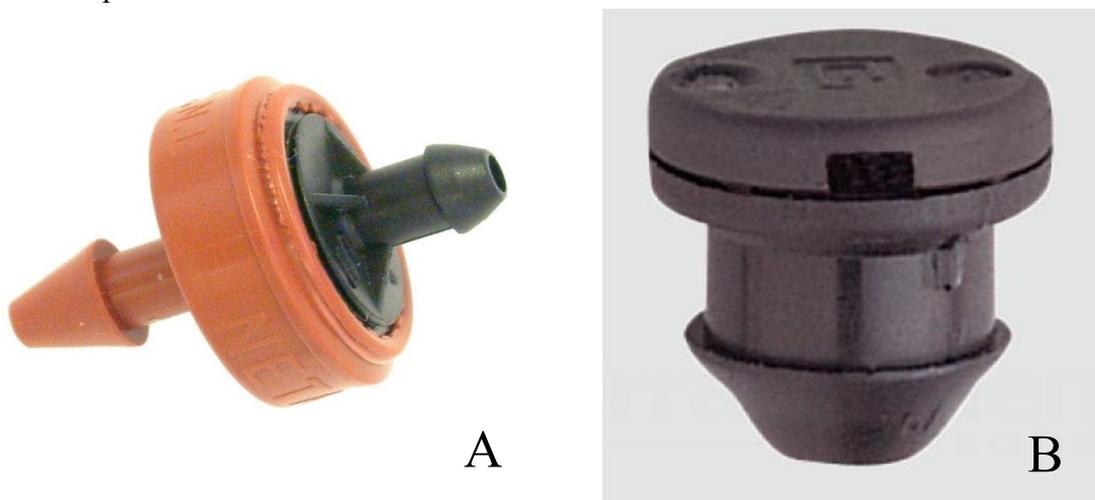


Figura 2. Gotejadores externos utilizados no experimento. A: com saída superior, B: com saída lateral.

APÊNDICE B. Área experimental



Figura 1. Vista geral da área experimental durante a execução do projeto.