



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CAMPINA GRANDE – PARAÍBA**



**CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO**

**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**CAMPINA GRANDE - PARAÍBA  
FEVEREIRO – 2015**

**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Campina Grande como parte das exigências do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola para obtenção do título de Doutora em Engenharia Agrícola.

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:**

**ENGENHARIA DE IRRIGAÇÃO E DRENAGEM**

**ORIENTADOR (a):**

**Dr<sup>a</sup>. Vera Lúcia Antunes de Lima – UFCG/CTRN/UAEA**

**Dr. Delfran Batista dos Santos – IFBaiano**

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA**

**FEVEREIRO – 2015**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

F383c Ferreira, Denise de Jesus Lemos.

Controle estatístico de qualidade em sistema de irrigação por gotejamento utilizando efluente de reator anaeróbio / Denise de Jesus Lemos Ferreira. – Campina Grande, 2015.

70 f. : il. color.

Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

"Orientação: Prof<sup>a</sup>. Dra. Vera Lúcia Antunes de Lima, Prof. Dr. Delfran Batista dos Santos".

Referências.

1. Qualidade de água. 2. Obstrução. 3. Uniformidade. I. Lima, Vera Lúcia Antunes de. II. Santos, Delfran Batista dos. III. Título.

CDU 631:628.1(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS  
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CAMPINA GRANDE – PARAÍBA



**PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA TESE DE DOUTORADO**

**DENISE DE JESUS LEMOS FERREIRA**

**CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO  
POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO**

**BANCA EXAMINADORA**

**PARECER**



**Dr<sup>a</sup>. Vera Lúcia Antunes de Lima**

Orientadora - UAEA/UFPG

APROVADO



**Dr. Delfran Batista dos Santos**

Orientador - IF Baiano

APROVADO



**Dr<sup>a</sup>. Claudia Facini dos Reis**

Examinadora - IDS/PB

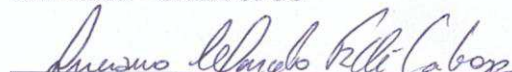
A PROVA DO



**Dr. Juarez Paz Pedroza**

Examinador - UAEA/UFPG

Aprovado



**Dr. Luciano Marcelo Fallé Saboya**

Examinador - UAEA/UFPG

APROVADO



**Dr. Roberto Vieira Pordeus**

Examinador - UFERSA

APROVADO

**CAMPINA GRANDE – PARAÍBA**

**FEVEREIRO – 2015**

A meus pais, Francisco Dinavan Lemos Ferreira (*in memorian*) e Francisca de Jesus Lemos Ferreira, alicerces da minha vida e peças fundamentais na minha trajetória, minha eterna gratidão.

A meu amado Pai, Francisco Dinavan Lemos Ferreira (*in memorian*), que sempre me ensinou a ser forte, determinada, ter caráter, ser fiel e lutar por tudo em que acredito, a quem eu dedico meu amor, minha admiração e meu respeito eterno.

A minha mãe, Francisca de Jesus Lemos Ferreira, que sempre se dedicou em cuidar de todos nós, com amor e paciência. Obrigada pela paciência e pelo amor a mim dedicado, sempre vou tê-la em meu coração com respeito e um amor especial.

A meu querido irmão, Djavan de Jesus Lemos Ferreira, meu melhor amigo, parceiro de todas as horas, que sempre me incentivou e deu força para superar todos os momentos difíceis. A minha cunhada, Paula Patrícia, pela amizade e incentivo.

Aos meus presentes de Deus, meus sobrinhos, Nicole Vitória e Djavan Nicolas, pelas luzes que são em nossas vidas, pela alegria que vocês nos dão pelo simples fato de existirem. Amo muito vocês, meus pequenos!!!

**DEDICO**

## AGRADECIMENTOS

A Deus, cuja grandiosa presença na minha vida me permitiu jamais fraquejar nos momentos mais difíceis, apoiando a concretização de mais um trabalho com êxito, jamais teria essa vitória sem a sua presença em todos os momentos.

A Universidade Federal de Campina Grande e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, pela oportunidade e apoio que tornaram possível a conclusão do doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos professores doutores Vera Lúcia Antunes de Lima e Delfran Batista dos Santos, pela orientação, ensinamentos repassados, apoio, paciência, amizade e, sobretudo, pela confiança no meu trabalho em prol da realização dessa Tese. Tenham certeza de que sempre terão meu carinho, respeito e amizade.

Ao professor Dr. Rafael Oliveira Batista, pelo apoio, amizade e pela grande contribuição que propiciou o melhor desenvolvimento do experimento.

Ao professor Dr. Luciano Falle Saboya, pela amizade, apoio na montagem e pelas contribuições para o bom andamento das atividades experimentais.

A pesquisadora Cláudia Facini dos Reis, pela amizade e contribuições preciosas que proporcionaram o melhor desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor Dr. Juarez Paz Pedrosa pela amizade e disponibilidade em contribuir para melhorar o trabalho final.

Ao professor Roberto Vieira Pordeus, pela sua disponibilidade e contribuições para o trabalho.

Aos professores da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, pelos ensinamentos repassados ao longo da minha vida acadêmica.

Ao professor Kepler, pelo apoio, gentileza e por todo ensinamento repassado contribuindo, assim, para um trabalho mais conciso e aprofundado.

Aos funcionários do Laboratório de Irrigação e Drenagem (LEID), seu Geraldo e seu Edil, pelo apoio na instalação e manutenção do experimento.

Aos secretários Isaias Araújo, Gilson e dona Aparecida, pela amizade e pronta assistência em todos os momentos.

Aos amigos da pós-graduação com quem convivi e os quais tornaram esse período mais agradável, a Aaron por se mostrar sempre disponível a colaborar; em especial aos amigos Flávio Costa, Sebastião e Rosinaldo, que colaboraram em muitos momentos na execução do experimento, em momentos adversos, sempre com muita alegria, disposição e carinho.

Aos meus queridos amigos: Abel Henrique, Débora Rafaelly, Flávio Gurjão, Patrícia Rodrigues e Taciano Pessoa, pela paciência, por todos os conselhos, pelo companheirismo e pela bela amizade que se desenvolveu ao longo dos nossos anos juntos de universidade.

Aos meus amigos: Conceição, Jofran, Clarice, Niédja e Rosângela que, mesmo distantes, sempre me passaram muito incentivo e força para a concretização deste trabalho, através de demonstrações de carinho e amizade que não tem relação alguma com os quilômetros de distância atual.

Aos amigos: Mayra Gislayne, Gleyka Nobrega, Jordânio Inácio e Patrício pela grande colaboração na execução do experimento tornando possível o bom andamento das atividades diárias e me proporcionando dias mais agradáveis e descontraídos.

Aos amigos: Queila Duarte, Aureliano, Juliana e Natália que sempre estão dispostos a ajudar e que me proporcionam dias muito agradáveis; às amigas: Deise, Luzia e Inácia pela alegria e carinho de sempre.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

## **CONTROLE ESTATÍSTICO DE QUALIDADE EM SISTEMA DE IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO UTILIZANDO EFLUENTE DE REATOR ANAERÓBIO**

### **RESUMO**

A irrigação é uma tecnologia importante no setor agrícola e que requer avaliação constante visando detectar problemas de forma rápida e precisa, para isso, algumas técnicas de modelagem estatística estão sendo utilizadas com grande de sucesso. Neste estudo objetivou-se aplicar técnicas de controle estatístico de qualidade, no monitoramento e avaliação de dois sistemas de irrigação por gotejamento (gotejador Taldrup e gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica) operando com água de abastecimento e com efluente de reator anaeróbio. O experimento foi conduzido no Laboratório de Irrigação e Drenagem da UFCG-PB. Avaliou-se a qualidade do processo de irrigação aplicando-se as cartas de controle de Shewhart aos indicadores de desempenho hidráulicos (vazão, coeficiente de uniformidade de distribuição – CUD, coeficiente de variação total – CVt e grau de entupimento – GE). As avaliações foram realizadas a cada 20 horas, sendo tomadas 26 medições totalizando 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação. Verificou-se, para os tratamentos com água de abastecimento, que os sistemas apresentaram excelente resposta mantendo-se dentro do controle estatístico para a maior parte do período estudado. Para os sistemas de irrigação operando com água residuária tratada, observou-se a falta de controle do processo a partir de 340 horas (PCJ-CNL com saída cilíndrica) e 380 horas (Taldrup) de funcionamento. A partir desse estudo, verificou-se que o indicador de obstrução que melhor representa o problema de entupimento nos sistemas de irrigação por gotejamento, é o grau de entupimento. No controle estatístico do processo o sistema de irrigação utilizando o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica, mostrou-se mais sensível ao entupimento não tendo mantido o mecanismo de compensação durante todo o tempo de funcionamento do sistema quando operando com água residuária tratada.

**PALAVRAS-CHAVE:** obstrução, qualidade de água, uniformidade.



## STATISTICAL QUALITY CONTROL OF DRIP IRRIGATION SYSTEM USING EFFLUENT OF ANAEROBIC REACTOR

### ABSTRACT

Irrigation is an important technology in the agricultural sector and requires constant evaluation to detect problems quickly and accurately, for this, some statistical modeling techniques are being used with great success. This study aimed to apply statistical quality control techniques in monitoring and evaluation of two drip irrigation systems (dripper Taldrip and dripper PCJ-CNL with flared port) operating with supply of water and anaerobic effluent. The experiment was conducted on Irrigation and Drainage Laboratory UFCG-PB. We evaluated the quality of the irrigation process applying up the Shewhart control charts to hydraulic performance indicators (flow, distribution uniformity coefficient - CUD, total variation coefficient - CVt and degree of clogging - GE). The evaluations were performed every 20 hours, being taken 26 measurements totaling 500 hours of operation of the irrigation system. It was found that for the treatments with water supply the systems presented excellent response keeping up within the statistical control for most of the study period. For irrigation systems operating with treated wastewater, there was a lack of process control starting from 340 hours (PCJ-CNL with flared port) and 380 hours (Taldrip) of functioning. From this study, we observed that the indicator of performance that best represents the clogging problem in drip irrigation systems is the degree of clogging. In statistical process control, the irrigation system using the PCJ-CNL dripper with flared port, was more sensitive to clogging has not maintained the compensation mechanism throughout the system operating time when operating with wastewater treated.

**KEYWORDS:** obstruction, water quality, uniformity.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1.</b> Layout das bancadas de madeira onde foi conduzido o experimento.....	31
<b>Figura 2.</b> (a) Bancada de irrigação operando com água de abastecimento e dois diferentes gotejadores; (b) detalhe do sistema de bombeamento das bancadas; (c) bancadas de irrigação operando com água residuária; (d) detalhe da fita gotejadora Taldrip instalada na bancada; (e) detalhe do gotejador PCJ-CNL saída cilíndrica instalado na bancada; (f) detalhe do procedimento de coleta dos dados no momento do ensaio .....	32
<b>Figura 3.</b> (a) Gotejador modelo PCJ-CNL com saída cilíndrica; (b) Fita gotejadora Taldrip com destaque para o emissor.....	33
<b>Figura 4.</b> Componentes de um Reator UASB .....	34
<b>Figura 5.</b> Planejamento do controle estatístico em um sistema de irrigação localizada .....	39
<b>Figura 6.</b> Gráficos de Normalidade para as vazões em sua totalidade para os tratamentos: (a) Tratamento AA1; (b) Tratamento AA2; (c) Tratamento AR1; (d) Tratamento AR2 .....	47
<b>Figura 7.</b> Box-plot do comportamento da vazão com relação aos tratamentos aplicados em função do tempo de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento .....	48
<b>Figura 8.</b> Relação Vazão e tratamentos de acordo com os posicionamentos dos emissores em relação ao tempo de funcionamento do sistema de irrigação .....	49
<b>Figura 9.</b> Gráfico Box-plot para os dados de vazão (a) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AA1; (b) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AA2; (c) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AR1; (d) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AR2 .....	50
<b>Figura 10.</b> Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento e gotejador PCJ (Tratamento AA1).....	52
<b>Figura 11.</b> Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento e gotejador Taldrip (Tratamento AA2) .....	53
<b>Figura 12.</b> Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água residuária e com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica (Tratamento AR1).....	55
<b>Figura 13.</b> Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água residuária e com o gotejador Taldrip (Tratamento AR2).....	56
<b>Figura 14.</b> (a) Fita gotejadora Taldrip após 500 horas de uso com água residuária tratada; (b) Gotejador PCJ- CNL com saída cilíndrica após 500 horas de uso com água residuária tratada; (c) detalhe do diâmetro de passagem do efluente no sistema de irrigação operando com a Fita gotejadora Taldrip; (d) detalhe do diâmetro de passagem do efluente no sistema de irrigação operando com o Gotejador PCJ- CNL com saída cilíndrica.....	57

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1.</b> Classificação da uniformidade de irrigação (CUD) .....	22
<b>Tabela 2.</b> Classificação do grau de entupimento em sistemas de irrigação por gotejamento .....	23
<b>Tabela 3.</b> Critérios para avaliação do potencial de entupimento de gotejadores por fontes de água que abastecem sistemas de irrigação localizada .....	24
<b>Tabela 4.</b> Especificações técnicas dos gotejadores escolhidos para o estudo.....	33
<b>Tabela 5.</b> Tratamentos experimentais dos sistemas de irrigação por gotejamento .....	36
<b>Tabela 6.</b> Análise da estatística descritiva para o tratamento AA1 (água de abastecimento operando com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação .....	43
<b>Tabela 7.</b> Análise da estatística descritiva para o tratamento AA2 (água de abastecimento operando com o gotejador Taldrip) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação.....	44
<b>Tabela 8.</b> Análise da estatística descritiva para o tratamento AR1 (água residuária operando com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação .....	45
<b>Tabela 9.</b> Análise da estatística descritiva para o tratamento AR2 (água residuária operando com o gotejador Taldrip) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação ..	46
<b>Tabela 10.</b> Parâmetros químicos e biológicos de qualidade do efluente tratado em cinco diferentes tempos de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento .....	58

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	12
1.1	OBJETIVOS .....	14
1.1.1	Objetivo Geral.....	14
1.1.2	Objetivos Específicos.....	14
2	REFERENCIAL TEÓRICO .....	15
2.1	Reuso de água e seu aproveitamento no setor agrícola .....	15
2.2	Sistema de Irrigação por Gotejamento .....	19
2.2.1	Uniformidade de aplicação no sistema de irrigação por gotejamento.....	20
2.2.2	Obstrução de emissores devido à qualidade da água.....	23
2.3	Controle estatístico da qualidade.....	27
2.3.1	Gráficos de Controle .....	28
3	MATERIAIS E MÉTODOS .....	30
3.1	Localização do experimento.....	30
3.2	Montagem das bancadas.....	30
3.3	Efluente utilizado no experimento .....	34
3.4	Condução do experimento.....	35
3.5	Qualidade da Água Residuária.....	38
3.6	Controle estatístico aplicado ao sistema de irrigação por gotejamento.....	39
3.6.1	Tratamento dos dados.....	40
3.6.2	Tratamento estatístico .....	40
3.6.3	Gráficos de Shewhart para mais de uma observação de vazão .....	41
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	42
4.1	Estatística descritiva dos dados e teste de normalidade .....	42
4.1.1	Estatística descritiva para os sistemas de irrigação por gotejamento operando com água de abastecimento .....	42
4.1.2	Estatística descritiva para os sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária tratada .....	44
4.1.3	Teste de Normalidade para os sistemas de irrigação por gotejamento .....	46
4.2	Controle estatístico do processo .....	50
4.3	Qualidade de água e sua relação com o risco a entupimento dos gotejadores.....	57
5	CONCLUSÕES.....	60
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	62

## 1 INTRODUÇÃO

A irrigação é uma técnica importante no setor agrícola, cujo valor é claramente perceptível aos profissionais que atuam na área, sobretudo por ser uma tecnologia que permite o aumento na produtividade agrícola, atendendo à demanda crescente por alimentos. Assim, é cada vez mais importante buscar técnicas de aperfeiçoamento dos sistemas de irrigação visando à sua maior eficiência. Para atingir essas finalidades é imprescindível realizar estudos que deem suporte eficaz na busca de melhorar a uniformidade do sistema, em detrimento das questões externas que possam influenciar neste desempenho.

A avaliação da irrigação é uma etapa relevante para se obter as informações relacionadas à eficiência de uso da água do sistema de irrigação, perdas durante a aplicação e uniformidade de distribuição de água, funcionamento real do sistema (vazão, pressão, lâmina, entupimento, etc.) e necessidade de manutenção (MANTOVANI et al., 2009).

A agricultura irrigada vem passando ao longo dos anos por grandes transformações no que diz respeito a estudos que visem detectar problemas de forma rápida e precisa; para isto, nota-se que algumas técnicas de modelagem matemática e estatística são utilizadas com grande margem de sucesso na avaliação de sistemas de irrigação.

O controle estatístico de qualidade é uma técnica perfeitamente adaptável ao sistema de produção agrícola, visto que, com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, redução de custos e aumento da produtividade, muitas vantagens são agregadas à competitividade no campo (Silva et al., 2007) sendo que o gráfico de controle é uma das principais ferramentas utilizadas no controle estatístico da qualidade (MONTGOMERY, 2004).

Dentre os sistemas de irrigação que o mercado oferece ao produtor rural, o que vem apresentando destaque no cenário nacional com grande expansão é a irrigação por gotejamento, tendo como principal vantagem a economia de água. Brauer et al. (2011), afirmam que a irrigação localizada pode ser definida como uma aplicação precisa de água na forma de gotas, por meio de emissores localizados em pontos selecionados ao longo das linhas condutoras de água e, se bem manejado, acarreta economia de água e energia elétrica.

Além do manejo adequado e do controle das perdas de água dos sistemas de irrigação, outra via para economia de água, de acordo com Lima et al. (2010), está relacionada ao uso de águas servidas, especialmente, oriundas de esgoto doméstico e de atividades agropecuárias.

Segundo Gobbi (2010), o uso de águas residuárias brutas e parcialmente tratadas, sobretudo para irrigação agrícola, é uma prática comum em algumas regiões do Brasil, sendo, entretanto, utilizada de forma indiscriminada e sem a proteção da saúde dos trabalhadores agrícolas e consumidores. Entretanto, de acordo com Batista et al. (2013), o sistema de irrigação por gotejamento também pode ser usado para aplicação de águas residuárias por causa da elevada eficiência de aplicação do efluente e do baixo risco de contaminação do produto agrícola e de operadores no campo.

As águas residuárias têm propriedades físico-química e biológicas adversas, quando observadas em relação à água de abastecimento, o que pode acarretar prejuízos para os sistemas de irrigação por gotejamento devido as pequenas aberturas dos emissores destinadas à passagem da água, provocando entupimento parcial ou total. As obstruções parciais ou totais nos emissores acarretam perdas na uniformidade de distribuição de água dos sistemas de irrigação, o que está associado diretamente à perda de produtividade na área irrigada, sendo necessário um monitoramento visando identificar quais os elementos presentes na água residuária que mais influenciam neste processo.

Portanto, o estudo do controle estatístico de qualidade proposto para esse projeto, busca investigar a influência da qualidade da água residuária sobre o potencial de obstrução dos gotejadores em um sistema de irrigação por gotejamento operando com efluente de reator anaeróbio.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar técnicas de controle estatístico de qualidade no monitoramento e na avaliação de um sistema de irrigação por gotejamento operando com efluente de reator anaeróbio.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Monitorar a qualidade físico-química e biológica da água de irrigação;
- Determinar os indicadores de desempenho (vazão, coeficiente de uniformidade de distribuição, coeficiente de variação de vazão e grau de entupimento) do sistema de irrigação por gotejamento;
- Analisar o comportamento dos indicadores de desempenho do sistema em relação ao seu tempo de funcionamento;
- Investigar a sensibilidade dos emissores do sistema de irrigação por gotejamento ao entupimento em decorrência do uso de diferentes emissores;
- Propor a inserção de novos parâmetros de qualidade de água para padronizar a obstrução dos emissores;
- Aplicar cartas de controle estatístico de processo na avaliação dos indicadores de desempenho do sistema de irrigação por gotejamento em relação ao tempo de funcionamento visando monitorar a obstrução dos emissores.

## **2 REFERENCIAL TEÓRICO**

### **2.1 Reuso de água e seu aproveitamento no setor agrícola**

A água é um recurso cada vez menos disponível, seja pelo crescimento populacional, com aumento da demanda, seja pelo o comprometimento do uso, especialmente pela poluição dos mananciais, além do fato de que a água é um recurso finito e o volume de água no planeta é constante (ANDRADE, 2008).

Quinto (2009) afirma que a crise da água vivenciada por vários países, em diferentes regiões do globo é provocada, não somente, pela escassez deste precioso recurso natural, face à demanda cada vez maior, mas também pela gestão inadequada, que vem degradando importantes mananciais, o que gera a procura, de forma cada vez mais intensa, de fontes alternativas de substituição de uso em atividades que necessitem de água de boa qualidade. Para Hussain et al. (2002), as águas residuárias compreendem resíduos líquidos gerados por residências, indústrias, atividades comerciais, em consequência de uso diário, produção e atividades de consumo. As águas residuárias de origem doméstica são, geralmente, perenes e sua composição é essencialmente orgânica e relativamente constante quando existe controle domiciliar de águas (LIMA, 2009).

Com a expansão das populações urbanas, maiores quantidades de esgotos municipais têm sido produzidas. Aumentou-se também a consciência de utilizá-lo de maneira segura e benéfica, já que o lançamento desses resíduos no ambiente afeta o uso posterior dos mananciais, seja pela poluição, pela demanda de oxigênio na decomposição de matéria orgânica, na contaminação por microrganismos patogênicos, pela eutrofização ou pela elevação do custo de tratamento para fins potáveis, que representam alguns dos impactos gerados (VON SPERLING, 1996; LÉON; CAVALLINI, 1999).

Os esgotos domésticos são provenientes principalmente de residências e de edificações públicas e comerciais que, concentram aparelhos sanitários, lavanderias e cozinhas. Apesar de variarem em função das condições socioeconômicas das populações, do clima e dos hábitos, os esgotos domésticos têm características bem definidas e se compõem, basicamente, das águas de banho, urina, fezes, restos de comida, sabões, detergentes e águas de lavagem (VON SPERLING, 1996; BRAGA et al., 2002).



Santos (2012), afirma que a água residuária é um recurso que pode ser aplicado em usos produtivos, com potencial de uso na agricultura, piscicultura, e outras atividades. Através do processo de utilização de águas oriundas de esgotos urbanos, por exemplo, para a irrigação, seria possível a liberação da água de melhor qualidade para as atividades nas quais ela é essencial. Sendo assim, as maiores vantagens do aproveitamento da água residuária, são: conservação da água disponível, sua grande disponibilidade, possibilidade do aporte e a reciclagem de nutrientes (reduzindo a necessidade de fertilizantes químicos) e concorrer para a preservação do meio ambiente (VAN DER HOEK et al., 2002).

Capra e Scicolone (2004), afirmaram que em muitas partes do mundo, a água residuária vem sendo aplicada às culturas, florestas, parques e campos de golfe. Em Israel mais especificamente, a irrigação com água residuária usa mais de 65% da produção total de esgotos sanitários do País (BOSCO, 2007).

De acordo com Santos (2012), apesar de alguns países já estabelecerem mercados de água, incluindo água de reuso e do Brasil realizar a prática de reuso em alguns estados, inexistente legislação específica brasileira tratando da temática.

Ayres e Westcot (1999) apontaram que a agricultura é a atividade na qual se utiliza a maior quantidade de água podendo tolerar águas de qualidade mais baixa do que a indústria e o uso doméstico. Desta forma, é inevitável que exista uma tendência crescente de se encontrar, neste setor, o uso de águas de qualidade inferior, gerando assim, um escoamento desses efluentes de maneira sustentável.

A abundância de nutrientes que contém as águas residuárias provenientes de esgotos domésticos é uma das principais razões de sua utilização na agricultura. Mediante a irrigação com água de esgotos tratados reduz-se, ou até mesmo se elimina o uso de fertilização com adubos químicos, o que pode representar uma diminuição de 50% dos custos de produção e, além do mais, os cultivos irrigados com águas residuárias apresentam maiores rendimentos que os cultivos irrigados com águas normais e fertilizados com adubos químicos (LÉON; CAVALLINI, 1999).

Duarte (2006), afirma que a decisão quanto ao reuso da água na agricultura, especialmente na irrigação de culturas, deve ser tomada com base em múltiplos aspectos, incluindo os de natureza ambiental, sanitário, cultural, técnico e econômico, de forma que os benefícios decorrentes do reuso superem os custos e riscos envolvidos neste processo. Segundo Guidolin (2000), é imprescindível destacar o conteúdo dos

elementos minerais presentes em efluentes urbanos brutos, destacando a presença de macronutrientes, como N, P e K, bem como de micronutrientes, como As, Cd, Cr, Hg, Mo, Ni, Pb, Se e Zn, alguns deles necessários ao desenvolvimento vegetal e outros até fitotóxicos. No que se refere aos patógenos, vetores de doenças ao ser humano, é preciso destacar que o solo atua como redutor do período de sobrevivência dos mesmos.

A contaminação do solo, das águas subterrâneas e superficiais em áreas com reuso de efluentes está intimamente ligada às características do efluente, e às propriedades de retenção e transmissão de água e solutos do solo, que podem limitar a sua aplicação (MARCIANO et al., 2001).

Nesse aspecto, a Organização Mundial de Saúde (WHO) estabeleceu, em 1990, diretrizes sanitárias para o uso de efluentes urbanos em irrigação, tendo em vista a rápida expansão dessa atividade em diversos países.

Hespanhol (2001) aponta que os benefícios do reuso de água são econômicos, ambientais, de saúde pública e outros indiretos. O aumento da produção de alimentos pode elevar o nível nutricional, a qualidade de vida e as condições sociais das populações beneficiadas pelo sistema de reuso, principalmente nos países em desenvolvimento. Brandão; Mota e Maia (2002), afirmam que o reuso da água na agricultura é um meio de proteção ambiental, já que pode promover a diminuição ou eliminação da eutrofização de recursos hídricos. Os benefícios econômicos estão diretamente ligados ao aumento da produtividade das culturas, desde que bem administrada a utilização da água residuária.

É importante destacar que a irrigação com esgoto sem tratamento adequado pode ser danosa ao meio ambiente, aos recursos hídricos superficiais e aquíferos subterrâneas, à saúde humana, ao solo e às culturas irrigadas, já que para um efluente bruto a carga poluidora nele encontrado é bem maior. Entre os poluentes mais comuns estão: a) a matéria orgânica que é representada pela demanda bioquímica de oxigênio (DBO), pela demanda química de oxigênio (DQO) e pelos sólidos suspensos totais (SST); b) poluentes orgânicos, como os agrotóxicos; c) poluentes inorgânicos, como os metais pesados; d) macronutrientes, como o nitrogênio e o fósforo; e) micro-organismos patogênicos, como bactérias, vírus e parasitos; e f) os elementos que conferem a salinidade da água (HARUVY, 1998; MANCUSO; SANTOS, 2003).

Ressalta-se que, desta forma, o tratamento dos efluentes para utilização na agricultura é imprescindível, haja vista que os riscos tendem a diminuir com o aumento

da qualidade do efluente. Entre os efeitos negativos encontrados nas águas residuárias utilizadas para irrigação se destacam:

- Poluição, particularmente por nitratos, de aquíferos subterrâneos utilizados para abastecimento público. Níveis de nitrato em água potável superiores a concentração entre 45 e 90 mg L<sup>-1</sup> podem causar metemoglobinemia em crianças. Além disso, a disposição de nitrogênio e fósforo nos corpos d'água superficiais e subterrâneos pode levar a eutrofização dos mesmos, promovendo, inclusive, mortandade de peixes (HARUVY, 1997).
- Acúmulo de contaminantes no solo, que pode levar à sua salinização ou criar ambiente propício para a proliferação de vetores transmissores de doenças;
- O excesso de nitrogênio no efluente pode comprometer a produção de culturas pouco tolerantes a este nutriente;
- A presença de íons específicos (boro, sódio e cloretos) pode ser tóxica a algumas culturas;
- Risco à saúde do trabalhador e consumidores dos produtos irrigados, devido à contaminação por micro-organismos patogênicos (bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos) presentes nos esgotos (CAPRA; SCICOLONE, 2004).

O reuso de água na agricultura pode ser vantajoso, visto que o nível de tratamento requerido para as águas residuárias frequentemente é moderado, a água residuária contém os nutrientes necessários às plantas e condiciona o solo, as áreas agrícolas podem ser adjacentes às estações de tratamento, e se gera renda com o crescimento das culturas (HAMMER; HAMMER Jr, 1996).

Além disso, são necessários grandes volumes de água para irrigação agrícola, fazendo com que o reuso agrícola surja como uma boa alternativa para a produção de alimentos. Segundo Hespanhol (2003), atualmente a agricultura depende do suprimento de água ao nível tal que a sustentabilidade da produção de alimentos não poderá ser mantida sem que critérios inovadores de gestão sejam estabelecidos e implementados em curto prazo.

Sugere-se atentar para as restrições e riscos potenciais que se devem levar em conta quando se faz reuso de água. Segundo Moscoso e Leon (1996), os principais são: a contaminação microbiológicas dos produtos agrícolas, a bio-acumulação de elementos

tóxicos, a salinização, impermeabilização do solo e o desbalanceamento de nutrientes no solo.

## **2.2 Sistema de Irrigação por Gotejamento**

A irrigação deve ser utilizada sempre que o déficit hídrico for uma limitação para o desenvolvimento e a produção da cultura, de modo que tem como objetivo aumentar a produtividade, garantir a qualidade na colheita, reduzir custos unitários de produção, melhorar a qualidade final do produto, dentre outros (ALBUQUERQUE, 2010; ANDRADE; BORGES JÚNIOR, 2008; BERNARDO; SOARES; MANTOVANI, 2005; COSTA et al., 2010a).

A agricultura é reconhecidamente a atividade humana que mais consome água, em média 70% de todo o volume captado, destacando-se a irrigação como atividade de maior demanda (CHRISTOFIDIS, 2001). Em áreas de clima seco, a irrigação é responsável pelo consumo de 50 a 85% dos recursos hídricos disponíveis (CAPRA; SCICOLONE, 2004).

A irrigação localizada é um método que mantém a umidade do solo na zona radicular próximo a capacidade de campo, o que é resultante da aplicação de lâminas de água com pequena intensidade e com elevada frequência (LIMA, 1999).

O sistema de irrigação localizada mais difundido nas propriedades agrícolas e também mais pesquisado é a irrigação por gotejamento. O método de irrigação por gotejamento apresenta algumas vantagens em relação aos outros métodos de irrigação, dentre os quais se podem destacar: eficiência no controle fitossanitário, não interfere nas práticas culturais, adapta-se a diferentes tipos de solos e topografia, pode ser usada com água salina ou em solos salinos, economia de energia e redução de mão-de-obra (AZEVEDO, 1986; AIROLDI, 2003).

A irrigação localizada está sujeita a alterações de vazão, tendo como consequência na sua pior hipótese a obstrução da emissão, pelo fato de utilizar emissores com orifícios de passagem de água muito pequenos, esta limitação acontece principalmente na irrigação por gotejamento que possui como grande limitação o fato de seus emissores possuírem orifícios e labirintos pequenos, suscetíveis ao entupimento, ocasionando perda da uniformidade de irrigação ao longo do tempo, porém este fato pode ser agravado com a utilização da aplicação de nutrientes via água de irrigação

assim como efluentes com altos teores de sólidos e bactérias formadoras de biofilme (CUNHA et al., 2013).

Apesar de todas as vantagens do sistema de irrigação por gotejamento, assim como os demais métodos de irrigação, este possui limitações, como: dificuldade no acompanhamento e monitoramento dos eventos de irrigação, menor opção de usos em lavouras, espaçamento entre linhas e as questões de rotação de culturas, custo de aquisição elevado, porém recuperado em um curto prazo, problemas de manutenção, questões operacionais, problemas de abandono, dentro outros (LAMM; CAMP, 2007).

O maior problema com o uso da irrigação por gotejamento é o entupimento do emissor (AHMED et al., 2007). A sensibilidade ao problema de entupimento varia com as características do emissor (Trooien et al., 2000) e com a qualidade da água relacionada aos aspectos físicos, químicos e biológicos (Nakayama; Bucks, 1991). A existência de partículas em suspensão na água de irrigação é tida como a maior causa de entupimento (LI et al., 2011).

### **2.2.1 Uniformidade de aplicação no sistema de irrigação por gotejamento**

Devido à proteção ambiental e a conservação de água cada vez mais necessária, a uniformidade de aplicação de água dos sistemas de irrigação ganhou importância (LOUIE; SELKER, 2000).

A uniformidade de emissão em um sistema de irrigação é um dos parâmetros mais importantes a ser avaliado, pois a partir dele pode-se observar se o manejo de aplicação de água a cultura está adequado, caso não esteja dentro do estabelecido para a cultura, deve-se investigar as causas do problema.

A avaliação de sistemas de irrigação logo após a implantação em campo é importante para verificar se o desempenho está de acordo com o estabelecido em projeto, possibilitando, quando necessário, a realização de ajustes para melhorá-lo (SOCCOL; ULMANN; FRIZZONE, 2002). Além disso, avaliações periódicas asseguram a manutenção do bom desempenho dos sistemas de irrigação (ROCHA et al., 1999).

Os sistemas de irrigação por gotejamento apresentam no mercado grande variedade de componentes e emissores, devido a maior demanda pelo método de irrigação localizada, os fabricantes nem sempre oferecem em seus catálogos,

informações técnicas suficientes para verificar seu desempenho, especialmente no campo, seja para os componentes novos, como após um determinado período de uso. Para obter informações mais precisas é necessário avaliar os equipamentos observando a viabilidade técnica e desempenho hidráulico sob as condições a que é submetido.

A relação entre vazão e pressão na entrada do gotejador, a perda de carga localizada com a sua inserção no tubo e arquitetura interna constituem características dos gotejadores (RAVINA et al., 1992). Estas características, segundo Gilaad et al. (1974), são influenciadas pela geometria, pelo material de constituição, pelo processo de fabricação e pelo método de instalação do gotejador na linha lateral.

O coeficiente de uniformidade de distribuição da água e a eficiência de aplicação são os principais parâmetros utilizados na avaliação de sistema de irrigação por gotejamento, pois expressam a qualidade da irrigação e são decisivos no planejamento e operação desses sistemas (BERNARDO, 2002).

É comum expressar a uniformidade de distribuição de água de um sistema de irrigação por meio de coeficientes de uniformidade que demonstram a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada sobre o solo (Oliveira et al., 2010). Solomon (1985), indica que essa uniformidade pode ser afetada por uma possível obstrução, pelo coeficiente de variação de fabricação, pela sensibilidade do emissor à temperatura, variações de pressão, dentre outros.

Com o objetivo de obter informação sobre os métodos utilizados na avaliação de sistemas de irrigação por gotejamento, verifica-se que no Brasil existe apenas a norma ABNT NBR ISO 9261 (2006), porém exclusiva para avaliar emissores novos em laboratório. Nos Estados Unidos da América, a American Society of Agricultural and Biological Engineers (ASAE) dispõe da norma EP405.1 (2008), com o propósito de estabelecer recomendações mínimas para a elaboração de projetos, instalação e avaliação de sistemas de microirrigação, dentre os quais o gotejamento.

Os trabalhos científicos publicados sobre a avaliação de sistemas de irrigação em uso empregam metodologias propostas por Keller e Karmeli (1974) para a coleta das vazões da seguinte maneira: escolher 4 tubos gotejadores dentro de um setor, coletar as vazões, do primeiro emissor, do emissor localizado a  $1/3$ , o emissor a  $2/3$  e o último emissor de cada tubo gotejador, totalizando 16 emissores. No Brasil emprega-se também a metodologia proposta por Deniculi et al. (1980), selecionam-se também 4 tubos, utilizando o mesmo critério de Keller e Karmeli (1974), quanto aos emissores,

selecionam-se os que estão localizados na ordem: primeiro a 1/7, 2/7, 3/7, 4/7, 5/7, 6/7 e o último, totalizando 32 emissores. De acordo com Hernández (2010), para os dois métodos, procede-se a coleta do volume de água, em cada emissor selecionado, no espaço de tempo superior a 3,5 minutos, repetindo três vezes a coleta do volume.

O coeficiente de variação de fabricação ( $CV_f$ ) é utilizado para classificar a qualidade dos emissores na indústria. Expressa, também, a dispersão relativa da distribuição da vazão. Utiliza-se para classificar os emissores (gotejadores), quando novos. Visando utilizar um referencial do Brasil, a seguir, descrevem-se as equações empregadas pela norma ISO 9261 (2006) relativa a emissores.

De acordo com a norma da ABNT ISO 9261 (2006), a vazão média da amostra não deve divergir da vazão nominal, por mais que  $\pm 7\%$ , assim como, o coeficiente de variação de fabricação ( $CV_f$ ) da amostra não deve exceder  $\pm 7\%$ .

Muitos coeficientes são utilizados para expressar a variabilidade de distribuição da água na irrigação, como o coeficiente de variação de vazão total ( $CV_t$ ), coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC), proposto por Christiansen (1942). Segundo Bernardo; Soares e Mantovani (2005), o valor mínimo admitido do CUC é de 80% dentro da parcela de irrigação no caso da irrigação localizada.

Para Pizarro (1996), a uniformidade para irrigação localizada de alta frequência (RLAF), emprega critérios mais exigentes que os propostos por Christiansen em 1942, recomendando-se o uso do Coeficiente de Uniformidade de distribuição (CUD). Bralts (1986) propôs a classificação para o CUD demonstrada na Tabela 1.

**Tabela 1.** Classificação da uniformidade de irrigação (CUD)

CUD	CLASSIFICAÇÃO
$\geq 90\%$	Excelente
80 a 90%	Bom
70 a 80%	Regular
$< 70\%$	Ruim

Fonte: Bralts (1986)

Segundo Gil et al. (2008), a baixa uniformidade de distribuição de água indica que parte da área irrigada recebe mais água e adubo do que outras, resultando num desenvolvimento desuniforme das plantas. O excesso de água no solo provoca a lixiviação de nutrientes, baixa concentração de oxigênio disponível às raízes e pode

aumentar a incidência de pragas e doenças, enquanto o déficit inibe o potencial produtivo da planta e aumenta os riscos de salinização do solo.

Vieira et al. (2004) descrevem a uniformidade na distribuição de água como um dos aspectos mais importantes no método de irrigação localizada, utilizando o sistema de gotejamento, porém, a desuniformidade dos gotejadores, devido a processos de fabricação, o dimensionamento inadequado do sistema, além do entupimento dos emissores são fatores que podem comprometer esta uniformidade.

### 2.2.2 Obstrução de emissores devido à qualidade da água

Ribeiro et al. (2010), estudando entupimento de tubos gotejadores convencionais com aplicação de cloreto de potássio, concluíram que os modelos de tubos gotejadores podem apresentar desempenhos variáveis, no coeficiente de variação de vazão e suscetibilidade ao entupimento, sugerindo que a arquitetura interna dos gotejadores que foram avaliados na caracterização do processo de entupimento foi o fator determinante.

Na maioria das vezes, o rápido entupimento dos sistemas de filtração está associado ao tamanho das aberturas dos elementos filtrantes e à qualidade dos efluentes (CAPRA; SCICOLONE, 2004; PUIG-BARGUÉS et al., 2005; YAMAMOTO et al., 2005; CAPRA; SCICOLONE, 2006). No caso dos gotejadores, a sensibilidade ao entupimento varia com as características do gotejador e com a qualidade dos efluentes relacionada aos aspectos físicos, químicos e biológicos (ADIN; SACKS, 1991; RAVINA et al., 1992; TROOIJEN et al., 2000; CAPRA; SCICOLONE, 2004).

Para se quantificar a obstrução nos sistemas de irrigação utiliza-se o grau de entupimento que é um índice que correlaciona a vazão do emissor usado com a vazão do emissor novo. Devido à falta de um padrão específico sobre o grau de entupimento em gotejadores, Morata et al. (2014), sugeriram uma classificação para o grau de entupimento em sistemas de irrigação por gotejamento, como apresentado na Tabela 2.

**Tabela 2.** Classificação do grau de entupimento em sistemas de irrigação por gotejamento

GE (%)	Classificação
<0	Sem entupimento
0 – 10	Baixo
10 – 40	Médio
40 – 90	Alto
90 – 100	Muito Alto

Fonte: Morata et al., 2014



Um fator indispensável que tem por finalidade obter um alto índice de uniformidade do sistema de irrigação está condicionado da qualidade de água. A avaliação da qualidade da água deve ser feita periodicamente com o intuito de prever o potencial risco ao entupimento dos emissores, de modo que as causas da obstrução podem ser separadas de acordo com a natureza, seja ela física, química ou biológica (AMORIM et al., 2010; AYERS; WESTCOT, 1994; NAKAYAMA; BUCKS, 1981). A Tabela 3, apresenta orientações de caráter quantitativo sugeridas por Bucks et al. (1979) e, Capra e Scicolone (1998) com relação a qualidade da água de irrigação relacionando-a com o risco ao entupimento para vazão nominal de até 12 L h<sup>-1</sup>. Os dois autores classificaram o estudo quanto ao risco de entupimento em três diferentes classes: menor, moderado e severo.

**Tabela 3.** Critérios para avaliação do potencial de entupimento de gotejadores por fontes de água que abastecem sistemas de irrigação localizada

Tipo de risco	Grau de entupimento					
	Menor		Moderado		Severo	
	A	B	A	B	A	B
<b>Físico</b>						
Sólidos Suspenso (mg L <sup>-1</sup> )	< 50	< 200	50 – 100	200 – 400	> 100	> 400
<b>Químico</b>						
pH	< 7,0	< n.c.	7,0 - 7,5	n.c.	> 7,5	n.c.
Sólidos dissolvidos (mg L <sup>-1</sup> )	< 500	< 625	500 – 2000	625 – 2900	> 2000	> 2900
Manganês total (mg L <sup>-1</sup> )	< 0,1	< 0,7	0,1 - 1,5	0,7 - 1,0	> 1,5	> 1,0
Ferro total (mg L <sup>-1</sup> )	< 0,2	< 0,5	0,2 - 1,5	0,5 - 1,2	> 1,5	> 1,2
Sulfeto de hidrogênio (mg L <sup>-1</sup> )	< 0,2	n.c.	0,2 - 2,0	n.c.	> 2,0	n.c.
Cálcio (mmolc L <sup>-1</sup> )	n.c.	< 12,5	n.c.	12,5 - 22,5	n.c.	> 22,5
Magnésio (mmolc L <sup>-1</sup> )	n.c.	< 2,0	n.c.	2,0 - 7,3	n.c.	> 7,3
<b>Biológico</b>						
População bacteriana (UFC mL <sup>-1</sup> )	< 10000	n.c.	10000 – 50000	n.c.	> 50000	n.c.

Nota: (a) Classificação segundo Bucks et al. (1979) e (b) Classificação segundo Capra e Scicolone (1998); n.c. – não classificado; UFC – unidades formadoras de colônias)

Os sólidos suspensos, em altas concentrações, são os elementos que causam os principais problemas de obstrução de emissores nos sistemas de irrigação localizada. Blum (2003), ressalta que águas residuárias que apresentem teores de sólidos em suspensão superiores a 30 mg L<sup>-1</sup> podem comprometer sistemas de irrigação por aspersão e gotejamento, além de causar danos ao sistema de bombeamento.

Outro problema frequente que ocasiona a obstrução em sistemas de irrigação localizada está relacionado à precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), estimado segundo índice de saturação de Langelier (LANGELIER, 1936).

$$ILS = pH_a - pH_c \quad (1)$$

em que:

pHa – pH da amostra de água

pHc – pH de equilíbrio para  $\text{CaCO}_3$

O cálculo de pHc é realizado obtendo-se as concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$  e pela soma das concentrações de  $\text{CO}_3^{2-}$  e  $\text{HCO}_3^-$  (LANGELIER, 1936). Quando o índice de Langelier for positivo há uma tendência de ocorrer a precipitação de  $\text{CaCO}_3$  ocasionando obstrução nos emissores. Da mesma forma, valores negativos do índice indicam que o  $\text{CaCO}_3$  se dissolverá na água de irrigação (AMORIM et al., 2008; AYERS; WESTCOT, 1994).

Substâncias químicas dissolvidas na água de irrigação como o carbonato de cálcio e o sulfeto de cálcio em elevadas concentrações podem precipitar e formar incrustações nas paredes das tubulações e emissores, limitando a passagem da água (RIBEIRO et al., 2005b). Os sólidos totais dissolvidos na água de irrigação para fins agrícolas não devem ultrapassar  $500 \text{ mg L}^{-1}$ . A concentração total de sais na água para irrigação normalmente é expressa em relação a sua condutividade elétrica (CE), que está relacionada basicamente com os sais e indica, portanto, a quantidade de íons mono e multivalentes contidos no líquido (SAMPAIO et al., 2007). Para Ribeiro et al. (2004), a CE é a variável mais aplicada para o monitoramento do nível de salinidade ou a concentração de sais solúveis na água de irrigação. Esta medida cresce proporcionalmente, à medida que a concentração de sais aumenta. Em geral, pode-se dizer que uma água com  $CE < 0,7 \text{ dS m}^{-1}$  não apresenta nenhuma restrição para uso na irrigação e fertirrigação. Porém, valores de CE acima de  $3,0 \text{ dS m}^{-1}$  passam a apresentar certa restrição de uso, sendo desaconselhável o uso dessa água para a irrigação (NAKAYAMA; BUCKS, 1986).

Ayers e Westcot (1999), afirmaram que as obstruções causadas pelas precipitações químicas ocorrem gradualmente e, portanto, sendo mais difíceis de serem

localizadas. As obstruções por micro-organismos (fitoplâncton, zooplâncton e bactérias) que se desenvolvem, alimentando-se de resíduos orgânicos ou inorgânicos presentes nas águas são causadas pelos filamentos dos micro-organismos que crescem formando uma matriz gelatinosa e pegajosa, que adere nas partes internas da tubulação e dos emissores. Já as obstruções oriundas de material em suspensão são as de mais fácil solução, haja vista que um eficiente sistema de filtragem pode reduzir significativamente o problema (CORDEIRO et al., 2003; SOUZA et al., 2006).

Ribeiro et al. (2005a), avaliaram o risco de entupimento em função da qualidade da água utilizada em sistema de irrigação por gotejamento e observaram que os parâmetros químicos que apresentaram médio risco de obstrução aos emissores, foram: pH, ferro e sulfetos. Os parâmetros físicos e biológicos analisados apresentaram baixo risco de entupimento dos emissores. Souza (2005), estudaram a susceptibilidade ao entupimento do sistema de microaspersão com águas residuárias de bovinocultura com concentrações de sólidos totais de  $18.629 \text{ mg L}^{-1}$ , observando que a partir de 21 horas de funcionamento do sistema ocorreu entupimento de origem física em todos os bocais, exceto no de diâmetro de 1,80 mm. Souza et al. (2006), utilizaram água residuária avícola (ARA) com concentrações de sólidos totais de  $15.437 \text{ mg L}^{-1}$ , sendo que estas propiciaram o entupimento de origem física dos bocais de diâmetro 0,90 e 1,00 mm, a partir de 20 h de funcionamento do sistema. Os bocais de diâmetro de 1,20, 1,40 e 1,80 mm foram os mais adequados para utilização nas concentrações de sólidos totais avaliadas.

Batista; Souza e Ferreira (2010) estudaram a ocorrência de entupimento em gotejadores e concluíram que o esgoto tratado provocou a formação de biofilme (bactérias e algas) dentro dos gotejadores propiciando a redução na uniformidade de aplicação, na ordem de 4,49% e 10,58% para os valores de CUC e CUD, respectivamente, quando se estabeleceu comparação entre os tempos de funcionamento 0 e 120 hs. Esses mesmos autores ainda constataram que a filtragem com membrana de 550 mesh e abertura dos finais de linha a cada duas semanas não previne a obstrução de gotejadores.

### 2.3 Controle estatístico da qualidade

A qualidade adquiriu ainda maior importância na produção em massa, onde se passou a inspecionar o produto no final do processo produtivo. Com o desenvolvimento de novos modelos gerenciais, a qualidade foi sendo focalizada ainda durante o processo produtivo, principalmente por meio de técnicas estatísticas (VARGAS; LOPES; SOUZA, 2004).

O controle de qualidade surgiu a partir do reconhecimento da variabilidade dos produtos na indústria. Veras (2009), afirma que numa produção sempre ocorre uma variação da matéria-prima, operários, equipamentos, etc. O mesmo autor ainda comenta que a questão não é distinguir a variação e sim separar as variações aceitáveis daquelas que indicassem problemas.

Segundo Follador et al. (2012), o controle de qualidade é vital por permitir que falhas sejam detectadas. Mais do que isso, sua função é importante ao possibilitar informações para não somente detectar os defeitos, como também para enfatizar a necessidade de melhoria no processo. Ou seja, terá a função de identificar as falhas no processo, definir suas causas e apontar formas para que estas não se repitam (MONTGOMERY, 2014).

O controle estatístico de qualidade (CEQ) surge como uma técnica que consiste em analisar o processo, estabelecer padrões, comparar desempenhos, verificar e estudar desvios, buscar e implementar soluções, analisar novamente o processo após as modificações, buscando a melhor performance de máquinas e/ou pessoas (MONTGOMERY, 2009b).

Segundo Costa; Epprescht e Carpinetti (2004), o controle permanente dos processos é condição básica para a manutenção da qualidade de bens. O termo qualidade significa atender às especificações. Quando se elabora uma especificação constitui-se uma fase inicial de um ciclo de controle de qualidade. A especificação indica aquilo que é desejado, a norma de qualidade.

Um processo está sob controle estatístico quando as causas especiais de variação são eliminadas do processo, e os pontos plotados no gráfico de controle permanecem dentro dos limites de controle (MONTGOMERY, 2013).

O controle de qualidade é perfeitamente adaptável ao sistema de produção agrícola. Sabe-se que, com a correção e a eliminação de desperdícios e falhas, redução

de custos e aumento da produtividade, inúmeras vantagens serão acrescentadas à competitividade no campo (SILVA et al., 2007).

### 2.3.1 Gráficos de Controle

Gráficos ou cartas de controle estatístico são ferramentas de monitoramento do desempenho de processos, utilizando medições de variáveis que influenciam na qualidade dos itens manufaturados como dados de entrada. As medições são realizadas em pontos espaçados no tempo e registradas nas cartas. Este registro resulta em gráficos temporais que apresentam os valores de medição da variável no eixo vertical e os pontos no tempo nos quais as medições são efetuadas no eixo horizontal. A cada medição, compara-se o resultado obtido com limites de controle: medições fora dos limites indicam a presença de causas especiais de variabilidade, anomalias ao processo, que prejudicam a qualidade do produto manufaturado (MICHEL et al., 2002a).

De acordo com Montgomery (2004), os gráficos de controle quando utilizados para analisar dados remetentes ao passado, caso tenha havido uma falha no processo, o mesmo, obviamente não foi parado. Nestes casos, atribuindo-se causas ou não, os pontos que indicaram falta de controle são eliminados. Dessa forma, é simulada a eliminação dos problemas e a continuidade do processo. Isso permite determinar limites de controle relacionados ao processo e determinar sua capacidade sob as condições que fora realizado.

Quando amostras preliminares são usadas para construir os gráficos de controle X e R são tratados como limites tentativos. Eles nos permitem determinar se o processo estava sob controle quando as iniciais foram selecionadas. Para testar a hipótese de controle do processo no passado, os valores são plotados em um gráfico que é analisado (MONTGOMERY, 2004).

É altamente recomendável que se tenha de 20 a 25 amostras ou subgrupos de tamanho  $n$ ; para calcular os Limites Tentativos (referentes ao passado) de controle. Naturalmente é possível trabalhar com menos dados, mas os limites de controle já não serão tão confiáveis (MONTGOMERY, 2004).

Os gráficos de controle são usados no monitoramento de processos para detectar qualquer alteração que possa afetar a qualidade na saída do processo. Em muitas situações, a qualidade do processo pode ser caracterizada por uma única variável

aleatória contínua, que geralmente assume uma distribuição normal. No entanto, é cada vez mais comum que os processos sejam caracterizados por várias, geralmente correlacionadas, variáveis. De fato existem muitos setores em que múltiplas variáveis definem a qualidade do processo (FARAZ; CHALAKY; MOGHADAM, 2011).

As cartas de controle do tipo Shewhart, introduzidas por volta de 1930, continuam a ser uma das ferramentas mais utilizadas em controle de qualidade. Na sua concepção e utilização é necessário ter-se em conta três aspectos fundamentais: os instantes de amostragem, o tamanho das amostras e os limites de controle. Nas cartas Shewhart clássicas, os valores destas grandezas são fixos durante todo o processo de controle. Em particular, usando uma carta de controle para a média, utilizam-se usualmente os limites 3- sigma (INFANTE; DIAS, 2006).

O gráfico de controle de Shewhart para medidas individuais pode ser aplicado em situações em que o tamanho da amostra para monitoramento do processo é  $n = 1$ , ou seja, a amostra consiste de uma única unidade individual. Em muitas aplicações dos gráficos de controle para unidades individuais utiliza-se a amplitude móvel de suas observações consecutivas como base para estimar a variabilidade do processo. Um gráfico de controle é composto de três linhas paralelas: uma linha média que reflete o nível de operação do processo, e duas linhas externas denominadas limite superior de controle (LSC) e limite inferior de controle (LIC), calculados em função do desvio padrão de alguma variável do processo (MONTGOMERY, 2013).

De acordo com Souza et al. (2008), um processo está fora de controle quando um ou mais pontos situarem-se fora dos limites, sob a configuração aleatória ou quando há configurações especiais com pontos dentro ou fora dos limites de controle. Para Werkema (2006), o processo está sob controle estatístico quando todos os pontos traçados no gráfico estão dentro dos dois limites de controle e se a disposição dos pontos é aleatória em torno da linha média (LM).

Justi et al. (2010), aplicaram o gráfico de controle de Shewhart em ensaios de irrigação por aspersão na avaliação do CUC e verificaram que um dos ensaios esteve acima do LSC e nenhum dos ensaios obteve CUC menor que o LIC. O restante dos ensaios permaneceu dentro dos limites de controle plotados no gráfico. A principal utilidade dos gráficos de controle é detectar falhas no decorrer de um processo em tempo real. Quando a falha é detectada o processo para, atribui-se uma causa à falha, o problema causa é eliminado e só então o processo é retomado.

### **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1 Localização do experimento**

O projeto foi desenvolvido em três bancadas experimentais localizadas em ambiente protegido pertencente ao Laboratório de Irrigação e Drenagem, LEID, da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG, no município de Campina Grande, PB. As coordenadas geográficas do local são: 7°12'52" de latitude Sul, 35°54'24" de longitude Oeste e altitude média de 550 m.

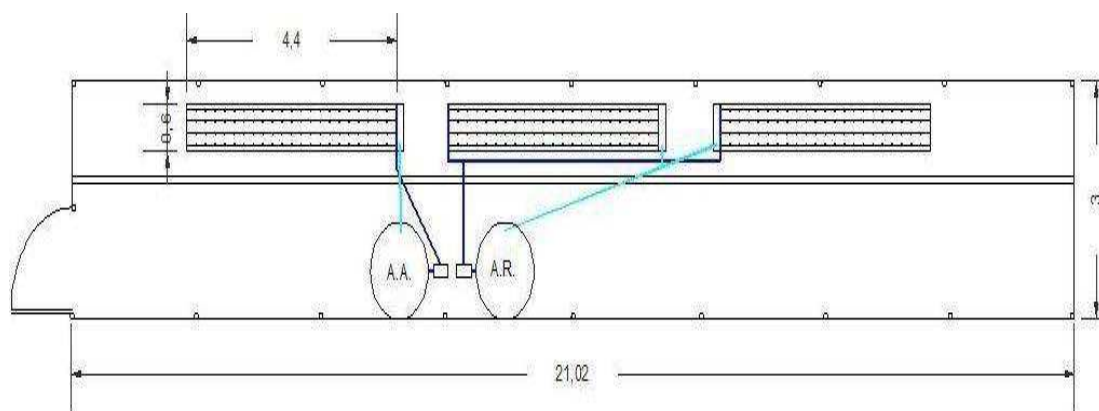
De acordo com a classificação de Köppen, o tipo de clima encontrado em Campina Grande, PB é As' (quente e úmido com chuva de outono-inverno). Caracteriza-se por apresentar chuvas de outono - inverno e um período de estiagem de cinco a seis meses. O período seco começa em setembro e se prolonga até fevereiro sendo mais acentuado no trimestre da primavera, salientando-se o mês de novembro como o mais seco. Já a estação chuvosa começa em março/abril e encerra em agosto. As temperaturas do ar variam entre a mínima de 19,5 °C e a máxima anual de 28,6 °C, a umidade relativa é bastante uniforme em toda a região, com médias em torno de 80% (LMRS/PB, 2007).

#### **3.2 Montagem das bancadas**

As bancadas de madeira, que serviram de suporte para os ensaios dos sistemas de irrigação (Figura 1) foram confeccionadas com as dimensões 0,60 m de largura por 4,40 m de comprimento e apoiadas em cinco peças de 1,20 m de altura, distanciadas 1,10 m. A parte superior foi constituída por uma moldura de 4,40x0,60m com espessura de 0,05m. Ao longo da moldura foram colocadas três peças de madeira de 0,05x0,6m distanciadas 1,10 m cada.

As bancadas contavam com prateleiras móveis de madeira que eram utilizadas apenas durante as avaliações dos sistemas de irrigação para suportar os recipientes coletores de água. Após as avaliações as prateleiras eram removidas de modo a permitir que água gotejada fosse reconduzida para o reservatório alimentando o processo de recirculação. Este processo consistia na saída da água do reservatório passando em

seguida pelos gotejadores, e daí a mesma caía sobre telhas de fibra de vidro e se dirigia para as calhas que recolhiam a água, reconduzindo-a ao reservatório.



**Figura 1.** Layout das bancadas de madeira onde foi conduzido o experimento

Em cada bancada experimental (Figura 2) foram instaladas quatro linhas laterais espaçadas 0,15 m umas das outras. O sistema de irrigação por gotejamento era composto dos seguintes equipamentos: reservatório com capacidade para 500 litros (caixa d'água de fibra de vidro), cujo bombeamento para a bancada se deu por meio do conjunto eletrobomba da Kajima modelo QB 60 de  $\frac{1}{2}$  CV (monofásica) 220 V, um filtro de disco de 120 mesh, dois manômetros de glicerina (um na saída da bomba e outro na extremidade final da linha principal), válvula de retenção, registros globo, tubo de PVC, mangueira de polietileno, fita gotejadora e gotejadores.





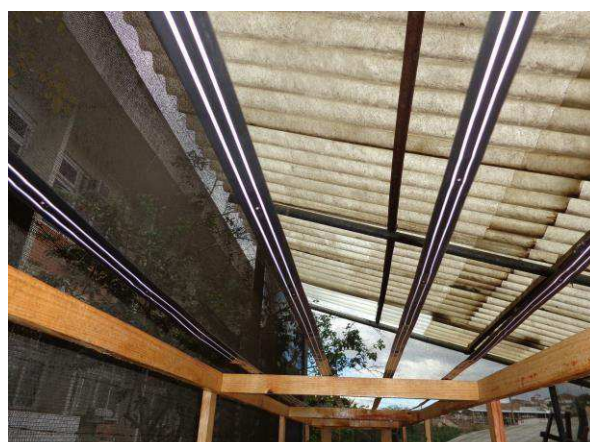
(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

**Figura 2.** (a) Bancada de irrigação operando com água de abastecimento e dois diferentes gotejadores; (b) detalhe do sistema de bombeamento das bancadas; (c) bancadas de irrigação operando com água residuária; (d) detalhe da fita gotejadora Taldrip instalada na bancada; (e) detalhe do gotejador PCJ-CNL saída cilíndrica instalado na bancada; (f) detalhe do procedimento de coleta dos dados no momento do ensaio

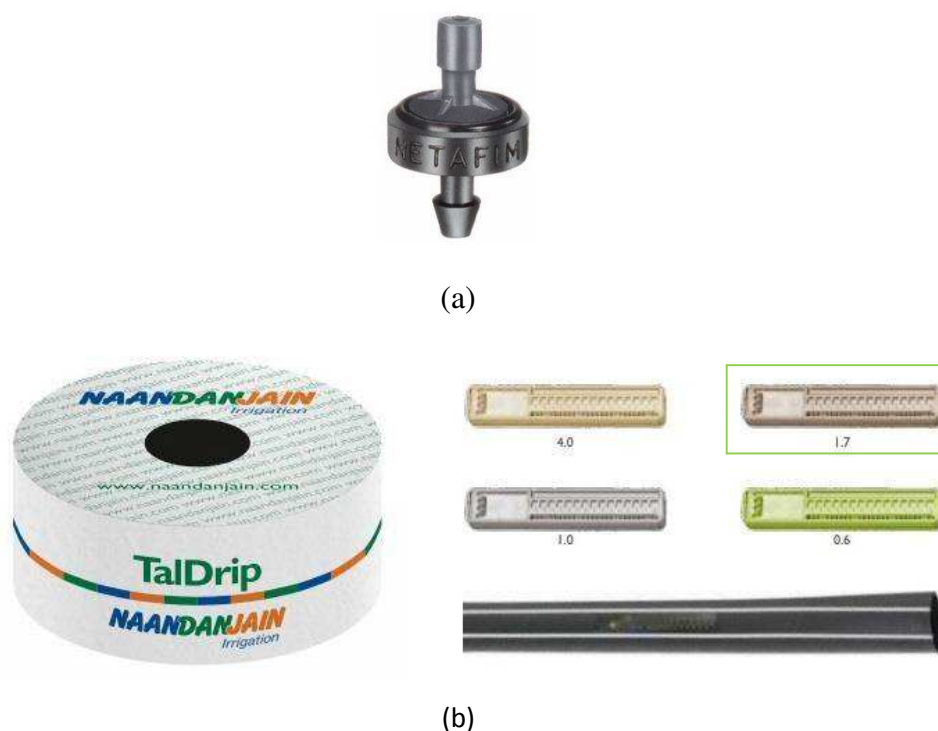
Foram avaliados os dois modelos de gotejadores, cujas especificações se encontram apresentadas na Tabela 4.

**Tabela 4.** Especificações técnicas dos gotejadores escolhidos para o estudo

Fabricante	Modelo	Vazão L h <sup>-1</sup>	DN Mm	PS kPa	Sistema de Funcionamento
Naandanjain <sup>1</sup>	Taldrip	1,7	17	50-300	NC*
Netafim <sup>1</sup>	PCJ-CNL saída cilíndrica	2,0	16	50-400	AC*

\*NC=Não compensante e AC=autocompensante

Duas bancadas foram utilizadas para os testes com água residuária e uma bancada com água de abastecimento. Na bancada com água de abastecimento foram inseridas duas linhas laterais com o gotejador modelo PCJ-CNL saída cilíndrica (Figura 3.a) e mais duas linhas com fita gotejadora Taldrip (Figura 3. b), com a finalidade do sistema de irrigação nesta bancada funcionar como o controle da irrigação.



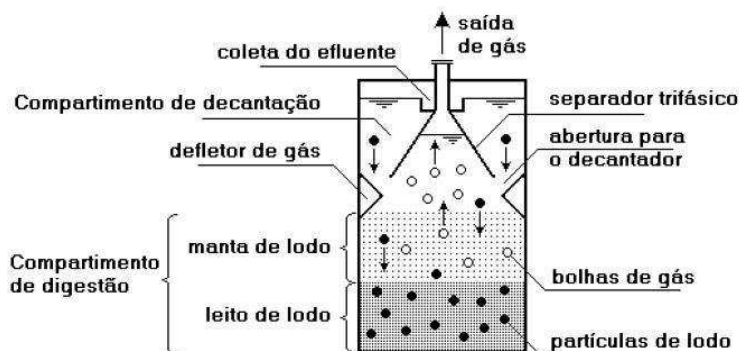
**Figura 3.** (a) Gotejador modelo PCJ-CNL com saída cilíndrica; (b) Fita gotejadora Taldrip com destaque para o emissor

Fonte: Catálogo Netafim Irrigation; Catálogo NaanDanJain Brasil Indústria e Comércio de Equipamentos para Irrigação Ltda

<sup>1</sup>O uso dos modelos e marcas na referida pesquisa não significam seu endosso, restringindo-se apenas a elemento de estudo

### 3.3 Efluente utilizado no experimento

O experimento foi conduzido utilizando-se água superficial poluída (origem doméstica), proveniente do córrego situado na UFCG, que passa por um sistema de tratamento através do reator UASB (Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente) instalado na estação de tratamento da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola, UFCG. O reator UASB (Figura 4) consiste de um leito de lodo, uma zona de sedimentação, e do separador de fase. O UASB é um reator anaeróbico que funciona pela ação das bactérias na ausência de oxigênio promovendo a oxidação da matéria orgânica (M.O.), em que o efluente é lançado no reator e se encontra com o compartimento de digestão (o contato que ocorre no compartimento de digestão permite a estabilização biológica da matéria orgânica, parte dessa matéria orgânica sedimenta e parte se transforma em biogás, entretanto, o biogás produzido pode carrear sólidos para o efluente final, motivo pelo qual é disposto na parte superior do reator um separador trifásico responsável pela separação das fases: sólida, líquida e gasosa do efluente no reator), após esse processo o efluente sai do reator clarificado, porém se deve fazer um monitoramento da qualidade do efluente visando conhecer suas propriedades químicas físicas e biológicas, após o tratamento.



**Figura 4.** Componentes de um Reator UASB

O bombeamento se deu através de uma bomba sápo instalada no local, sendo transportado por meio de uma tubulação de polietileno de 25 mm de diâmetro e posteriormente armazenado em uma caixa d'água com capacidade para 500 L.

### 3.4 Condução do experimento

O experimento foi conduzido no período de agosto de 2014 a dezembro de 2014, no primeiro mês os sistemas operaram com água de abastecimento, procedimento este realizado visando corrigir e melhorar as condições experimentais. A partir do mês de setembro de 2014, o experimento consistiu em duas bancadas com os sistemas de irrigação operando com água residuária submetida ao tratamento do reator UASB e uma bancada operando com água de abastecimento contando-se, a partir deste momento, o tempo de funcionamento em função dos indicadores de desempenho dos sistemas de irrigação. Além disto, foram retiradas cinco amostras do efluente ao longo do experimento para posteriores análises físico-químicas e microbiológicas, buscando caracterizar os componentes presentes no efluente do sistema de irrigação por gotejamento correlacionando-os com o risco ao entupimento dos gotejadores.

Os ensaios foram realizados a partir da retirada de 4,40 m de fita gotejadora e mangueira de 17 mm de polietileno para cada linha lateral, o espaçamento adotado foi o recomendado pelo fabricante para a fita gotejadora (garantindo-se pelo menos 10 gotejadores por linha lateral), e para a mangueira de polietileno foi utilizado o mesmo espaçamento para a inserção do botão gotejador, tal procedimento foi realizado visando submeter as mesmas condições dos diferentes modelos de gotejador para a posterior comparação do desempenho dos dois modelos.

As avaliações dos sistemas de irrigação por gotejamento foram realizadas a cada 20 horas de funcionamento com 26 medições durante todo o período do experimento para cada gotejador, totalizando 500 horas. Quanto ao início e parada, o funcionamento dos sistemas de irrigação foi realizado de forma manual, acionando-se o conjunto eletrobomba, abrindo-se o registro de passagem de água e se regulando a pressão. A operação dos sistemas se deu em dois ciclos diários, com duração de 4 horas cada e intervalo de descanso de 1,0 hora totalizando oito horas por dia. Os horários pré-estabelecidos foram: 00:08 hs às 12:00 hs e 13:00 hs às 17:00 hs, de segunda-feira a sexta-feira.

Para a avaliação foi inserida uma bateria de recipientes com volume de 300 ml. A pressão estabelecida para o funcionamento do sistema de irrigação foi a pressão de serviço de 10 m.c.a (100 KPa), a qual foi aferida e controlada, a partir dos dois manômetros de glicerina.

A coleta de dados foi amostral, conforme metodologia proposta por Deniculi et al. (1980) descrita no item 2.2.1. O sistema contou com quatro linhas laterais, em cada linha foram selecionados 8 gotejadores, totalizando 32 gotejadores por bancada. Os tratamentos consistiram em: sistema de irrigação operando com água de abastecimento e o gotejador PCJ-CNL saída cilíndrica (AA<sub>1</sub>), sistema de irrigação operando com água de abastecimento e a fita gotejadora Tal drip (AA<sub>2</sub>), sistema de irrigação operando com água residuária do reator UASB e o gotejador PCJ-CNL saída cilíndrica (AR<sub>1</sub>), sistema de irrigação operando com água residuária do reator UASB e a fita gotejadora Tal drip (AR<sub>2</sub>), conforme a Tabela 5.

**Tabela 5.** Tratamentos experimentais dos sistemas de irrigação por gotejamento

Tratamento	Pressão de Serviço (KPa)	Vazão média (L/h)	Número de ensaios
AA1	100	2,0	26
AA2	100	1,7	26
AR1	100	2,0	26
AR2	100	1,7	26

As coletas do efluente e água de abastecimento nos ensaios das bancadas de irrigação, foram realizadas utilizando-se recipientes coletores de 300 ml, posicionados abaixo dos gotejadores avaliados, com cinco repetições, o período de tempo estipulado para cada repetição foi de cinco minutos, o qual foi marcando com o auxílio de um cronômetro totalizando um tempo de coleta de 25 minutos para cada bancada. Este procedimento foi realizado de forma sequencial colocando-se os recipientes abaixo das linhas laterais e os deixando sob os gotejadores. Após o período de tempo da avaliação de cada tratamento (cinco repetições), a água foi quantificada através de provetas de 100 ml, as leituras dos volumes foram anotadas e posteriormente se procedeu aos cálculos de vazão e de todos os indicadores de desempenho do sistema de irrigação. A vazão foi definida pelo método volumétrico procedendo-se à coleta da água diretamente no gotejador.

A vazão do sistema de irrigação foi determinada em condições de bancada, no primeiro momento para os gotejadores novos e posteriormente para os gotejadores em fase de uso, estimando os indicadores de desempenho (Vazão –  $q$ , Coeficiente de uniformidade de distribuição – CUD, coeficiente de variação de vazão total – CVt e grau de entupimento (GE) dos gotejadores) conforme as equações de 2 a 6:

Com volumes de água coletados nos gotejadores é possível obter a vazão dos emissores a partir da equação 2, a seguir:

$$q = \frac{V}{1000 \cdot t} \cdot 60 \quad (2)$$

em que:

q – vazão do gotejador, L h<sup>-1</sup>;

V – volume de água coletada, mL;

t – tempo de coleta da água, min.

Com a vazão dos gotejadores calculada é possível determinar o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD) que consiste na média do menor quartil dos gotejadores de menor caudal (q<sub>25</sub>, dividido pelo valor médio da vazão (q de todos os gotejadores, conforme a equação 3):

$$CUD = 100 \cdot \frac{q_{25}}{\bar{q}} \quad (3)$$

em que:

CUD – coeficiente de uniformidade de distribuição de água, %;

q<sub>25</sub> – vazão média de 25% do total de provetas que receberam as menores precipitações, L h<sup>-1</sup>;

$\bar{q}$  - vazão média ponderada, considerando-se todas as provetas, L h<sup>-1</sup>.

O coeficiente de variação (CV) é expresso conforme a equação 4.

$$CV_t = \frac{S_n}{\bar{q}} \cdot 100 \quad (4)$$

em que:

CVt – coeficiente de variação de vazão total, %;

S<sub>n</sub> – desvio padrão da vazão dos gotejadores novos, L h<sup>-1</sup>;

$\bar{q}$  - vazão média ponderada do gotejador novo, L h<sup>-1</sup>.

O desvio padrão (S<sub>n</sub>) é expresso pela equação 5, a seguir:

$$S_n = \sqrt{\frac{\sum_i (q_i - \bar{q})^2}{N - 1}} \quad (5)$$

em que:

$q_i$  - vazão coletada em cada gotejador, L h<sup>-1</sup>;

$\bar{q}$  - vazão média ponderada, considerando-se todos os gotejadores, L h<sup>-1</sup>.

N – número de gotejadores utilizados.

Com o cálculo do grau de entupimento (GE) dos gotejadores foi possível acompanhar as mudanças nas características hidráulicas ao longo do tempo, e sua sensibilidade ao entupimento, onde faz-se uma relação entre a vazão dos gotejadores usados e novos, conforme apresentado na equação 6.

$$GE = \left( 1 - \frac{q_{usado}}{q_{novo}} \right) \cdot 100 \quad (6)$$

em que:

GE – grau de entupimento, %;

$q_{usado}$  – vazão do gotejador usado, L h<sup>-1</sup>;

$q_{novo}$  – vazão do gotejador novo, L h<sup>-1</sup>.

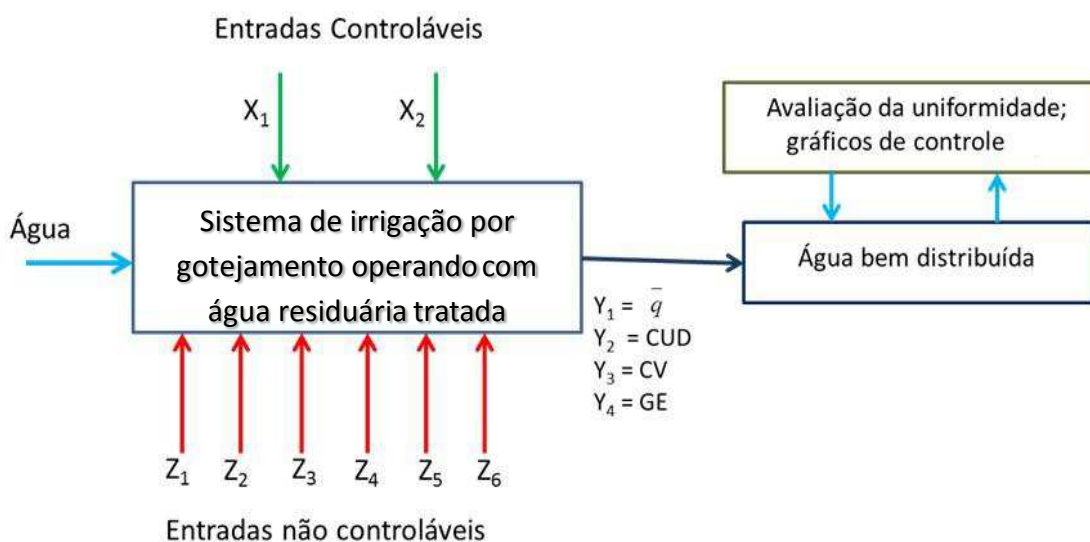
### 3.5 Qualidade da Água Residuária

As amostras do efluente foram retiradas na saída do gotejador seguindo-se a metodologia padrão recomendada pela NBR 9898/85, para os tempos de funcionamento de 60, 180, 280, 380 e 480 horas de funcionamento, totalizando cinco amostras. Tal procedimento foi realizado com o intuito de caracterizar o efluente que circula pelo sistema de irrigação por gotejamento e verificar a eficiência do sistema de filtragem. As análises foram realizadas no Laboratório de Referência em Dessalinização (LABDES) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG).

As análises do efluente foram importantes devido à necessidade de se conhecer a composição físico-química e microbiológica da água de irrigação, como: pH, condutividade elétrica – CE, sólidos suspensos, sólidos totais dissolvidos, as concentrações de P, K, Ca, Mg, Fe, Amônia entre outros; além das análises microbiológicas (Coliformes Totais), segundo metodologia proposta pela APHA (1995).

### 3.6 Controle estatístico aplicado ao sistema de irrigação por gotejamento

Com a finalidade de verificar o desempenho do sistema de irrigação por gotejamento ao longo do seu tempo de funcionamento, foi utilizado o controle estatístico de qualidade visando adaptar essa ferramenta para avaliar o processo de desgaste do sistema. Empregando as técnicas de controle da melhoria da qualidade, conclui-se que o planejamento do experimento segue a configuração do esquema apresentado na Figura 5, cujas entradas controláveis ( $x_n$ ) correspondem às variáveis:  $x_1$ : pressão do sistema; e  $x_2$ : Passagem de água controlada por registro de globo. As entradas de difícil controle ou não-controláveis ( $Z_n$ ) são:  $Z_1$ : qualidade da água;  $Z_2$ : temperatura da água;  $Z_3$ : temperatura do ar;  $Z_4$ : insolação;  $Z_5$ : desgaste dos tubos gotejadores; e  $Z_6$ : entupimento dos emissores devido ao uso do conjunto do sistema de irrigação.



**Figura 5.** Planejamento do controle estatístico em um sistema de irrigação localizada

A técnica de controle estatístico de qualidade busca verificar o desempenho do sistema de irrigação por gotejamento tendo, a partir dos seus gráficos de controle, uma estimativa da eficiência da irrigação durante os ensaios, como também, quais seriam os melhores momentos de parada do sistema para operações de manutenção visando



manter o mínimo entupimento e a boa distribuição de água, de maneira uniforme na área e, conseqüentemente, uma produtividade maior das culturas.

### 3.6.1 Tratamento dos dados

Os dados coletados foram tabulados em planilha eletrônica calculando-se a vazão média ( $\bar{q}$ ), o desvio padrão amostral (s), o coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), o coeficiente de variação de vazão total (CVt) e o grau de entupimento (GE). A análise estatística das vazões foi realizada correlacionando-as com o tempo de funcionamento do sistema; com auxílio do software computacional Minitab foram confeccionados os gráficos de controle e gráficos de normalidade.

### 3.6.2 Tratamento estatístico

Os dados foram tabulados em planilha eletrônica do programa computacional Excel e analisados pelo Software Minitab 15. As medidas estatísticas empregadas para os indicadores de desempenho foram: Média aritmética das vazões, Erro da média, Desvio padrão, Coeficiente de variação (CV), Valor mínimo encontrado ( $Q_{\min}$ ), Valor máximo encontrado ( $Q_{\max}$ ), simetria, curtose, valor de probabilidade do teste de hipótese (P valor) do teste de normalidade de Anderson-Darlin.

A análise estatística foi realizada em função do arranjo amostral do número de amostras (n) de vazões:

n = 832 - corresponde ao número de vazões coletadas ao longo do tempo, de cada tratamento. Resulta da soma das vazões dos 32 emissores (e) nas 26 coletas.

n = 104 - as vazões dos 4 linhas laterais para cada tratamento nas 26 coletas; cada linha lateral (L) identificada pela sua ordem, L1, L2, L3 e L4.

n = 208 - as vazões dos 8 emissores (e) de cada linha lateral nas 26 coletas, os 8 emissores (e) identificados pela sua posição conforme a metodologia de Deniculi et al. (1980).

e1- vazões dos 4 primeiros emissores de cada linha lateral;

e2 - vazões dos 4 emissores localizados a 1/7 do comprimento de cada linha lateral;

e3 - vazões dos 4 emissores localizados a 2/7 do comprimento de cada linha lateral;

e4 - vazões dos 4 emissores localizados a 3/7 do comprimento de cada linha lateral;

- e5 - vazões dos 4 emissores localizados a 4/7 do comprimento de cada linha lateral;
- e6 - vazões dos 4 emissores localizados a 5/7 do comprimento de cada linha lateral;
- e7 - vazões dos 4 emissores localizados a 6/7 do comprimento de cada linha lateral;
- e8 - vazões dos 4 emissores localizados no fim de cada linha lateral.

Salienta-se que os tratamentos AA1 e AA2 possuem apenas duas linhas laterais cada um, ficando o arranjo estatístico dos dados para gotejadores e linhas laterais com apenas duas repetições na bancada.

### 3.6.3 Gráficos de Shewhart para mais de uma observação de vazão

Foram confeccionados gráficos de  $\bar{X}$ , para os parâmetros de vazão, coeficiente de uniformidade de distribuição (CUD), grau de entupimento (GE) e coeficiente de variação de vazão total (CVt) para os dois modelos de gotejadores avaliados (26 amostras de vazão com cinco observações).

A seguir estão as fórmulas para a construção dos limites de controle para o gráfico  $\bar{X}$ :

$$LSC = \bar{x} + 3\sigma \quad (7)$$

$$\text{Linha central} = \bar{x}$$

$$LIC = \bar{x} - 3\sigma \quad (8)$$

em que:

$$\sigma = MR \cdot (d_2)^{-1} \quad (9)$$

$\sigma$ : é o estimador do desvio padrão populacional ( $\sigma$  não-viesado, este necessita de um fator de correção denominado  $d_2$  tabelado que depende do tamanho da amostra;

$MR$ : amplitude amostral média;

$\bar{x}$ : é a linha central das médias dos valores de vazão.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Estatística descritiva dos dados e teste de normalidade**

A partir do estudo da estatística descritiva e gráfica de cada tratamento pôde-se identificar e avaliar a homogeneidade, normalidade, pontos discrepantes e não normalidade. Visto que, as vazões podem variar ao longo da linha lateral devido à perda de carga no conduto e em virtude do tempo de uso do sistema de irrigação no campo.

#### **4.1.1 Estatística descritiva para os sistemas de irrigação por gotejamento operando com água de abastecimento**

Na Tabela 6, se encontra a análise da estatística descritiva para os dados de vazão no tratamento AA1 (sistema de irrigação operando com água de abastecimento e o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica). Observa-se a partir dos dados da referida tabela que, em sua totalidade, as vazões ( $n=416$ ) se mantiveram próximo à vazão de  $2,00 \text{ L h}^{-1}$  no conduto (linhas laterais) ao longo do tempo de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento, o que era previsto por se tratar de um gotejador autocompensante, com exceção da linha 1 (L1) para os gotejadores sete (posição 19 na LL) e oito (posição 21 na LL) que excederam a proporção de 10% da variação de vazão na linha lateral, este incremento na vazão média dos referidos gotejadores pode ter ocorrido em razão da dilatação do material do tubo ao longo da linha lateral, já que sobre o final da linha na bancada de testes que operava com água de abastecimento ocorreu a incidência de luz solar durante as tardes no decorrer do período dos ensaios.

Ainda se verifica, pela Tabela 6, que o desvio padrão para todos os tratamentos apresentou pequena variabilidade, comprovado pelos valores de CVt que variaram entre 1,35 a 5,59%, mantendo-se dentro da faixa não excedendo  $\pm 7\%$  da vazão conforme a Norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) recomenda para sistemas de irrigação por gotejamento, indicando desta forma, que os dados apresentam homogeneidade. Hermes (2010) avaliando um sistema de irrigação por gotejamento com aplicação de água de abastecimento e carga hidráulica de 1,5 m, obteve resultados semelhantes aos da presente pesquisa.

Quanto à assimetria, todos os tratamentos obtiveram valores positivos próximos a zero, com exceção dos tratamentos para os emissores “e1”, “e3” e “e4” que apresentaram valores negativos também próximos a zero indicando, segundo SILVA et al. (2007) simetria da distribuição. Para uma distribuição da curva normal simétrica, os valores da média e mediana se apresentam coincidentes ou próximos, o que pode ser verificado na Tabela 6. Vale salientar que o valor da medida de assimetria indica o grau de assimetria de uma distribuição de frequências unimodal em relação a uma linha vertical que passa por seu ponto mais elevado; se o valor for negativo, a distribuição está desviada para a esquerda e caso o valor seja positivo, está desviada para a direita. Uma distribuição razoavelmente simétrica deve ter coeficiente de assimetria variando entre  $-1$  e  $+1$ . Com relação à curtose, verifica-se que os dados apresentaram valores negativos para os emissores “e1”, “e2”, “e6”, “e7” e “e8” indicando um achatamento na curva normal de distribuição, e também para os casos dos valores positivos a curva apresenta um pico na distribuição dos dados.

**Tabela 6.** Análise da estatística descritiva para o tratamento AA1 (água de abastecimento operando com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação

N	Média q(L/h)	Desvio Padrão	CV <sub>t</sub>	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
<b>416</b>	1,997	0,0808	4,05	1,826	1,981	2,335	1,51	2,98
<b>208 L1</b>	2,025	0,0924	4,56	1,882	1,990	2,335	1,42	1,24
<b>208 L2</b>	1,969	0,0551	2,8	1,826	1,969	2,124	0,16	0,34
<b>52 e1</b>	1,941	0,0565	2,91	1,826	1,939	2,035	-0,11	-1,07
<b>52 e2</b>	1,986	0,0433	2,18	1,882	1,976	2,059	0,07	-0,57
<b>52 e3</b>	1,959	0,0297	1,52	1,867	1,958	2,028	-0,40	1,42
<b>52 e4</b>	1,976	0,0267	1,35	1,898	1,978	2,040	-0,46	1,37
<b>52 e5</b>	1,966	0,0271	1,38	1,901	1,967	2,057	0,24	1,92
<b>52 e6</b>	2,015	0,0441	2,19	1,937	2,010	2,124	0,50	-0,30
<b>52 e7</b>	2,084	0,1157	5,55	1,860	2,072	2,323	0,11	-0,98
<b>52 e8</b>	2,052	0,1147	5,59	1,858	2,018	2,335	0,55	-0,43

Na Tabela 7 observa-se a análise estatística para o tratamento AA2 (sistema de irrigação operando com água de abastecimento operando e o gotejador Taldrip). A partir da análise dos dados pôde-se verificar que, apesar do sistema de irrigação operar com um gotejador não-compensante, as médias das vazões ( $1,50 \text{ L h}^{-1}$ ) na sua totalidade ( $n=416$ ) não sofreram grandes alterações quando comparadas, a vazão contida no catálogo do fabricante, ao longo das 500 horas de funcionamento. De forma semelhante ao tratamento AA1, o desvio padrão apresentou pequena variabilidade e os valores de CVt variaram entre 2,95 e 4,56% mantendo-se dentro da faixa recomendada pela norma

ABNT NBR ISO 9261 (2006). Verificou-se ainda, pela Tabela 7, que os valores da assimetria foram, em sua maioria, negativos, próximos a zero e todos os valores de curtose apresentaram-se positivos, indicando picos na curva normal de distribuição dos dados; evidencia-se um pico mais elevado para o emissor “e3” com valor da curtose de 10,61 indicando que a distribuição dos valores apresenta alta concentração próximo à média, observou-se ainda, que o referido emissor apresentou a maior assimetria negativa indicando o maior deslocamento da curva normal para o lado esquerdo.

**Tabela 7.** Análise da estatística descritiva para o tratamento AA2 (água de abastecimento operando com o gotejador Tal drip) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação

N	Média q(L/h)	Desvio Padrão	CV	Mínimo	Mediana	Máximo	Assimetria	Curtose
<b>416</b>	1,501	0,0545	3,63	1,162	1,507	1,661	-0,82	3,69
<b>208 L1</b>	1,513	0,0461	3,05	1,382	1,514	1,661	0,10	0,49
<b>208 L2</b>	1,490	0,0597	4,01	1,162	1,498	1,627	-1,08	3,92
<b>52 e1</b>	1,504	0,0444	2,95	1,382	1,510	1,601	-0,33	0,51
<b>52 e2</b>	1,519	0,0471	3,10	1,390	1,518	1,661	0,23	1,11
<b>52 e3</b>	1,497	0,0683	4,56	1,162	1,499	1,627	-2,26	10,61
<b>52 e4</b>	1,510	0,0522	3,46	1,385	1,513	1,625	-0,18	0,08
<b>52 e5</b>	1,502	0,0483	3,21	1,390	1,511	1,620	-0,20	0,27
<b>52 e6</b>	1,492	0,0531	3,56	1,368	1,502	1,615	-0,24	0,20
<b>52 e7</b>	1,502	0,0553	3,68	1,320	1,506	1,646	-0,68	2,30
<b>52 e8</b>	1,485	0,0604	4,06	1,342	1,498	1,620	-0,44	0,00

Embora tenham ocorrido algumas diferenças entre os dois tratamentos, de forma geral, o comportamento dos sistemas de irrigação por gotejamento operando com água de abastecimento foi semelhante ao longo das 500 horas de funcionamento, fato que se deve, primordialmente, à qualidade da água que favoreceu o bom andamento dos sistemas e seus devidos manejos.

#### **4.1.2 Estatística descritiva para os sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária tratada**

O desempenho dos sistemas de irrigação por gotejamento operando com água residuária foi diferenciado dos demais já que se estava trabalhando com águas de qualidade inferior, sendo insustentável que esses sistemas mantivessem, ao longo das 500 horas de funcionamento, um comportamento semelhante ao do uso com água de abastecimento.

Na Tabela 8 observa-se a análise estatística para o tratamento AR1 (água residuária operando com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica). A partir da análise dos dados pôde-se verificar que apesar de se tratar de um sistema de irrigação operando com gotejadores autocompensantes as médias das vazões ( $1,59 \text{ L h}^{-1}$ ) apresentaram, na sua totalidade ( $n=832$ ), perdas proporcionais de vazão na razão de aproximadamente 25%, o que é uma variação considerável e orienta que deve ocorrer mudança de estratégia de manejo para o método de irrigação localizado operando com efluentes. O coeficiente de variação de vazão total foi de 23,33% ultrapassando o valor recomendado pela norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) evidenciando que o mecanismo de compensação automática do gotejador não obteve efeito durante parte do tempo transcorrido do experimento com o uso da água residuária.

**Tabela 8.** Análise da estatística descritiva para o tratamento AR1 (água residuária operando com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação

N	q(L/h)	Desvio		Min	Mediana	Max	Assimetria	Curtose
		Padrão	CV					
<b>832</b>	1,591	0,3712	23,33	0,362	1,642	2,100	-0,600	-0,51
<b>208 L1</b>	1,552	0,4248	27,38	0,362	1,631	2,078	-0,630	-0,53
<b>208 L2</b>	1,645	0,3486	21,20	0,768	1,729	2,066	-0,730	-0,61
<b>208 L3</b>	1,575	0,0345	21,91	0,648	1,577	2,088	-0,370	-0,82
<b>208 L4</b>	1,593	0,3569	22,41	0,569	1,598	2,100	-0,500	-0,61
<b>104 e1</b>	1,760	0,3346	19,02	0,773	1,932	2,081	-1,280	0,48
<b>104 e2</b>	1,732	0,3204	18,50	0,900	1,878	2,057	-1,270	0,25
<b>104 e3</b>	1,606	0,3869	24,09	0,742	1,672	2,088	-0,500	-1,03
<b>104 e4</b>	1,583	0,3270	20,65	0,768	1,561	2,083	-0,230	-0,95
<b>104 e5</b>	1,538	0,3209	20,87	0,948	1,514	2,066	0,010	-1,09
<b>104 e6</b>	1,562	0,3642	23,32	0,362	1,606	2,033	-0,990	0,98
<b>104 e7</b>	1,498	0,3720	24,84	0,648	1,543	2,066	-0,160	-0,93
<b>104 e8</b>	1,451	0,4301	29,65	0,434	1,519	2,100	-0,410	-0,70

Na Tabela 9 tem-se a análise da estatística descritiva dos dados para o tratamento AR2 (água residuária operando com o gotejador Taldrip). De acordo com os dados observa-se que o sistema de irrigação operando com o gotejador não-compensante manteve uma média de ( $1,37 \text{ L h}^{-1}$ ) na sua totalidade ( $n=832$ ); desta forma, pode-se afirmar que o gotejador apresentou um decréscimo de vazão na ordem de 20% quando comparado com o gotejador novo. O coeficiente de variação de vazão total chegou a 16,91% ultrapassando o valor recomendado pela norma ABNT NBR ISO 9261 (2006), o que já era previsto em virtude do sistema estar operando com água

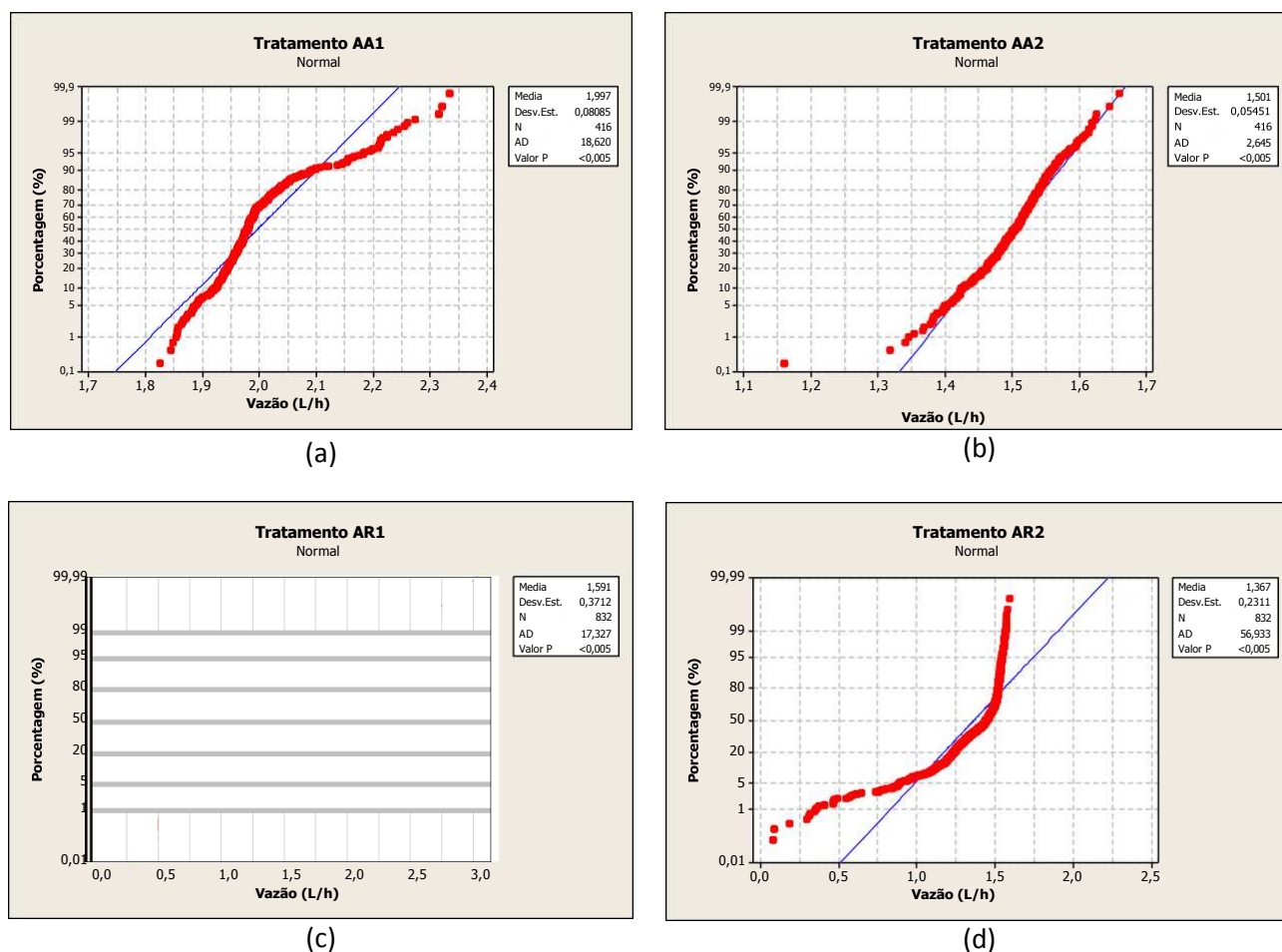
residuária, que apresenta uma carga orgânica e físico-química diferenciada da água de abastecimento.

**Tabela 9.** Análise da estatística descritiva para o tratamento AR2 (água residuária operando com o gotejador Tal drip) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação

<b>N</b>	<b>q(L/h)</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>CV</b>	<b>Min</b>	<b>Mediana</b>	<b>Max</b>	<b>Assimetria</b>	<b>Curtose</b>
<b>832</b>	1,367	0,2311	16,91	0,084	1,457	1,598	-2,400	7,25
<b>208 L1</b>	1,368	0,2399	17,53	0,084	1,462	1,598	-2,680	8,90
<b>208 L2</b>	1,390	0,1769	12,72	0,614	1,466	1,582	-1,550	2,60
<b>208 L3</b>	1,353	0,2519	18,61	0,187	1,465	1,579	-2,140	5,01
<b>208 L4</b>	1,356	0,2477	18,27	0,089	1,440	1,577	-2,490	7,56
<b>104 e1</b>	1,407	0,1428	10,15	0,977	1,466	1,579	-0,960	0,04
<b>104 e2</b>	1,396	0,1564	11,20	0,979	1,468	1,570	-0,780	-0,51
<b>104 e3</b>	1,385	0,1668	12,04	0,941	1,457	1,560	-0,920	-0,37
<b>104 e4</b>	1,386	0,2001	14,43	0,466	1,450	1,570	-2,110	5,44
<b>104 e5</b>	1,368	0,2456	17,95	0,470	1,465	1,598	-1,910	3,33
<b>104 e6</b>	1,381	0,1841	13,33	0,552	1,448	1,577	-1,760	4,13
<b>104 e7</b>	1,334	0,2823	21,17	0,187	1,447	1,577	-2,230	4,98
<b>104 e8</b>	1,279	0,3635	28,43	0,840	1,427	1,574	-1,930	2,75

#### 4.1.3 Teste de Normalidade para os sistemas de irrigação por gotejamento

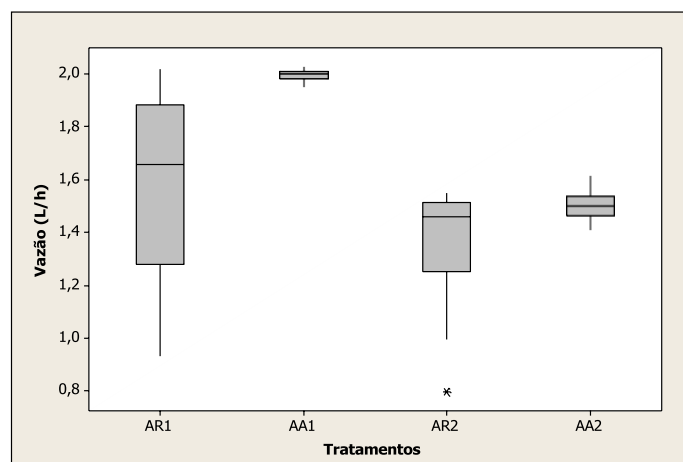
A partir da análise da Figura 6. (a) a (d) foi possível verificar, para os quatro tratamentos estudados que, com relação à aplicação do teste de normalidade de Anderson-Darlin, os sistemas de irrigação apresentaram em todos os tratamentos (na sua totalidade) dados que seguiram um padrão de normalidade.



**Figura 6.** Gráficos de Normalidade para as vazões em sua totalidade para os tratamentos: (a) Tratamento AA1; (b) Tratamento AA2; (c) Tratamento AR1; (d) Tratamento AR2

No diagrama de caixa verifica-se, na Figura 7, que de forma geral ocorreu apenas um valor de vazão discrepante no tratamento AR2; entretanto, se nota que no tratamento AR1 apesar da não ocorrência de valores discrepantes a variabilidade dentro dos ensaios é alta variando de valores próximos a  $2,0 \text{ L h}^{-1}$  a menos de  $1,0 \text{ L h}^{-1}$ ; esta variação ocorre no decorrer do tempo de funcionamento do sistema de irrigação; nos tratamentos com uso de água de abastecimento os dois gotejadores se mantiveram com vazões dentro da faixa prevista no catálogo do fabricante.



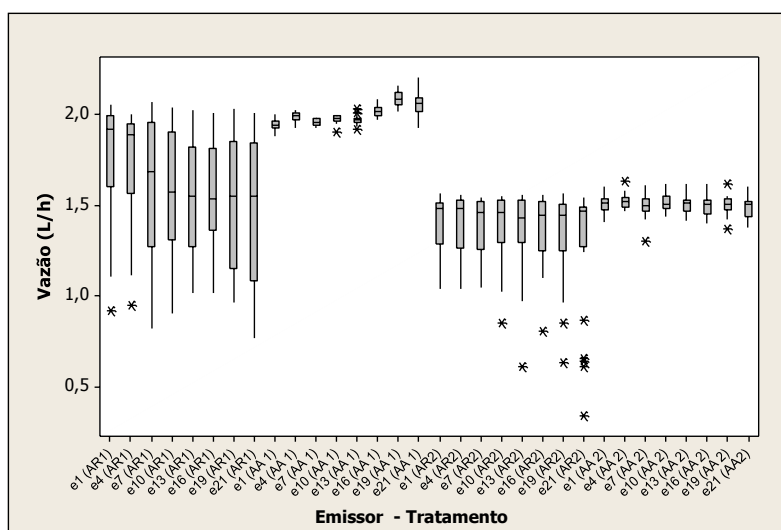


**Figura 7.** Box-plot do comportamento da vazão com relação aos tratamentos aplicados em função do tempo de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento

Na Figura 8 se encontram os quatro tratamentos analisados de acordo com o posicionamento dos gotejadores nos gráficos de diagramas de caixa ou “box-plot”, com relação às 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento. A partir da referida figura, se observa que, para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento (tratamentos - AA1 e AA2) suas vazões se mantiveram relativamente constantes ao longo da linha lateral, em especial para o tratamento AA1, onde o modelo de gotejador utilizado foi o autocompensante, ocorreu um acréscimo de vazão nos três últimos gotejadores das LL, em razão das observações ao longo dos ensaios; atribui-se esse acréscimo a variável climática (devido à ação da radiação sobre as linhas laterais) que, provavelmente, tenha vindo a causar essa notável diferença; observa-se ainda que os gotejadores 4 (posição 10) e 5 (posição 13) tiveram valores discrepantes ao longo do seu tempo de funcionamento, enquanto para o tratamento AA2 os valores discrepantes ocorreram nos gotejadores 2, 3 e 7 mas que, de maneira geral, a vazão nos emissores se manteve relativamente próxima com cerca de 13% de diferença com tendência de ocorrer redução de vazão ao longo do conduto (linha lateral) com o tempo de uso do sistema.

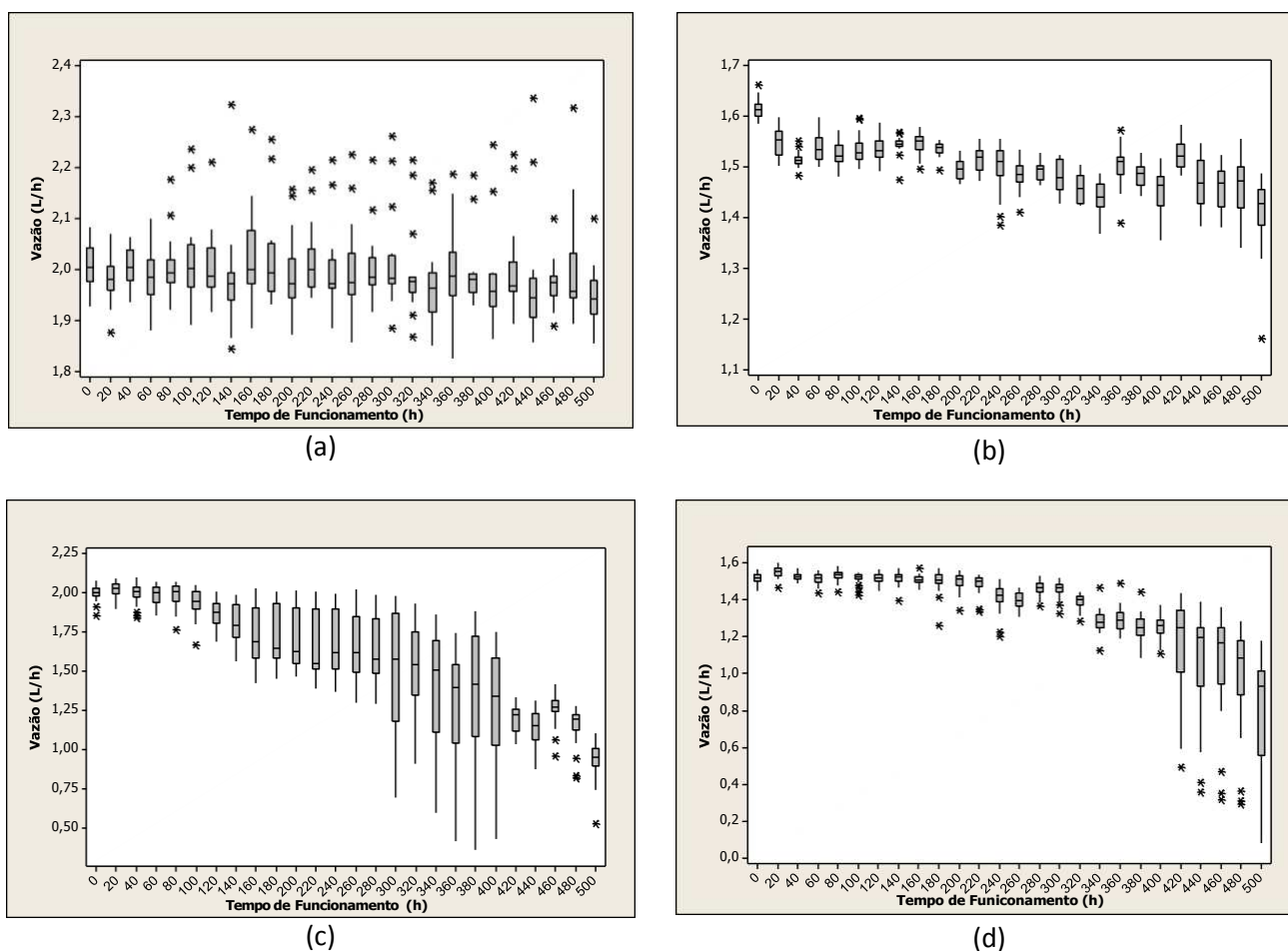
Ainda pela Figura 8 foi possível verificar que no tratamento AR1 ocorreram valores discrepantes para o gotejador 1 e 2; relacionando o posicionamento dos emissores nas linhas laterais com o tempo de uso do sistema de irrigação, houve redução de vazão gradativa do primeiro para o último gotejador. Para o tratamento AR2, observam-se valores discrepantes para os gotejadores 4, 5, 6, 7 e 8, sendo o maior número para o último gotejador. Notadamente na grande parte das vazões discrepantes

ocorre um decréscimo, que se revela como indicativo de entupimento do sistema de irrigação durante seu tempo de uso.



**Figura 8.** Relação Vazão e tratamentos de acordo com os posicionamentos dos emissores em relação ao tempo de funcionamento do sistema de irrigação

Na Figura 9 estão apresentados os gráficos de box-plot para os quatro tratamentos evidenciando o comportamento do sistema de irrigação por gotejamento, a cada ensaio. A partir da Figura 9 (a) a (d) observam-se valores de vazões discrepantes ao longo do tempo de funcionamento destacando-se o tratamento AA1, que apresentou valores discrepantes para quase todos os ensaios.



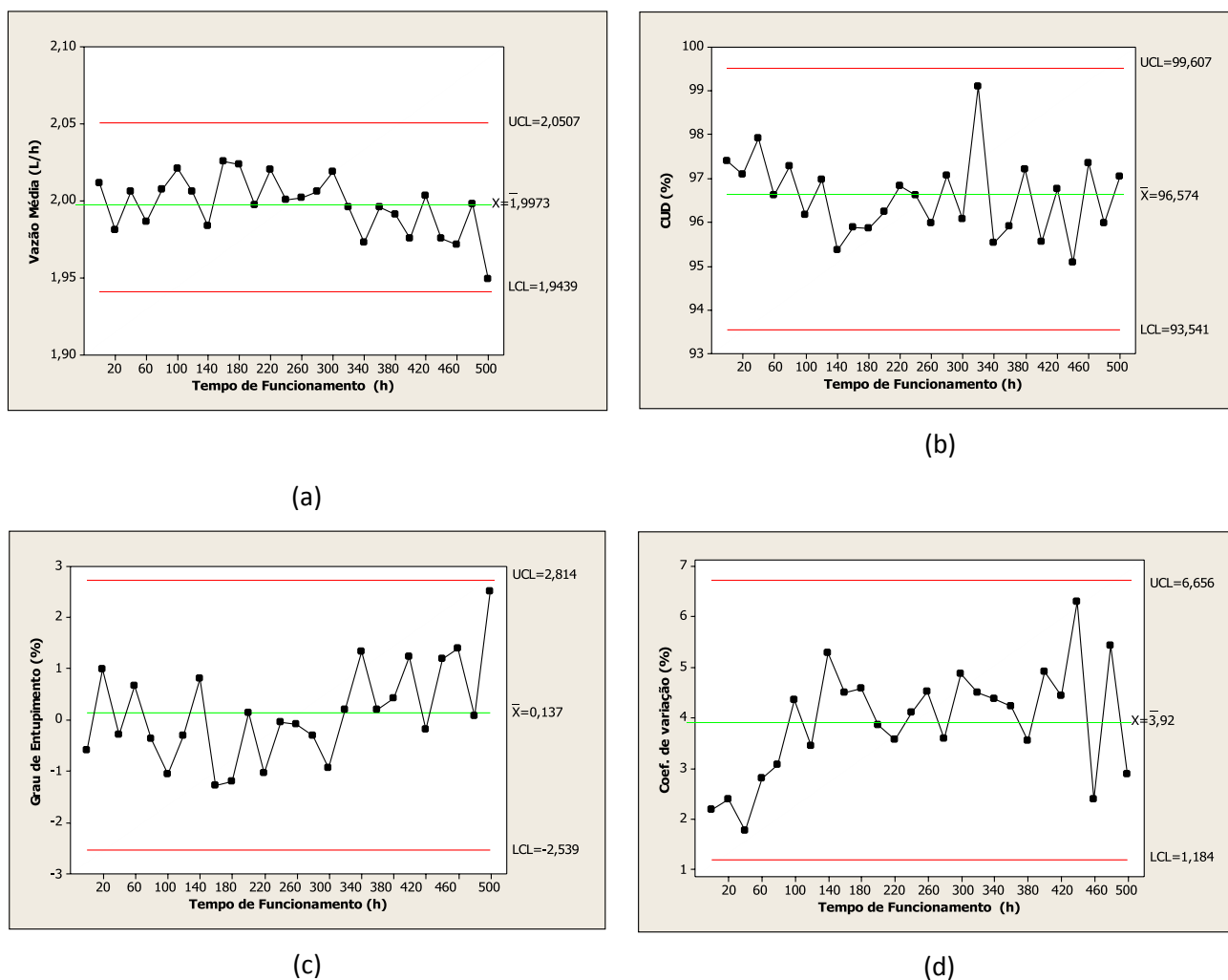
**Figura 9.** Gráfico Box-plot para os dados de vazão (a) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AA1; (b) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AA2; (c) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AR1; (d) análises das vazões ao longo do tempo para o tratamento AR2

## 4.2 Controle estatístico do processo

Para controlar a qualidade do processo de irrigação em estudo foram aplicadas as cartas de controle de Shewhart visando monitorar os indicadores de desempenho ao longo do tempo de funcionamento dos sistemas de irrigação por gotejamento.

Na Figura 10 se encontra o controle estatístico para os indicadores de desempenho: vazão, CUD, GE e  $CV_f$  para o tratamento AA1. Observa-se, a partir desta figura, que todos os indicadores se mantiveram dentro dos limites de controle ao longo das 500 horas de ensaio. Embora estejam sob controle estatístico, os gráficos da Figura 10 mostram, a partir das 320 horas de funcionamento a ocorrência de um decréscimo da vazão (Figura 10 (a)) e todos os ensaios apresentaram, com exceção das 420 horas, variações sempre abaixo da linha média ( $X=1,99 \text{ L h}^{-1}$ ) indicando, de acordo com

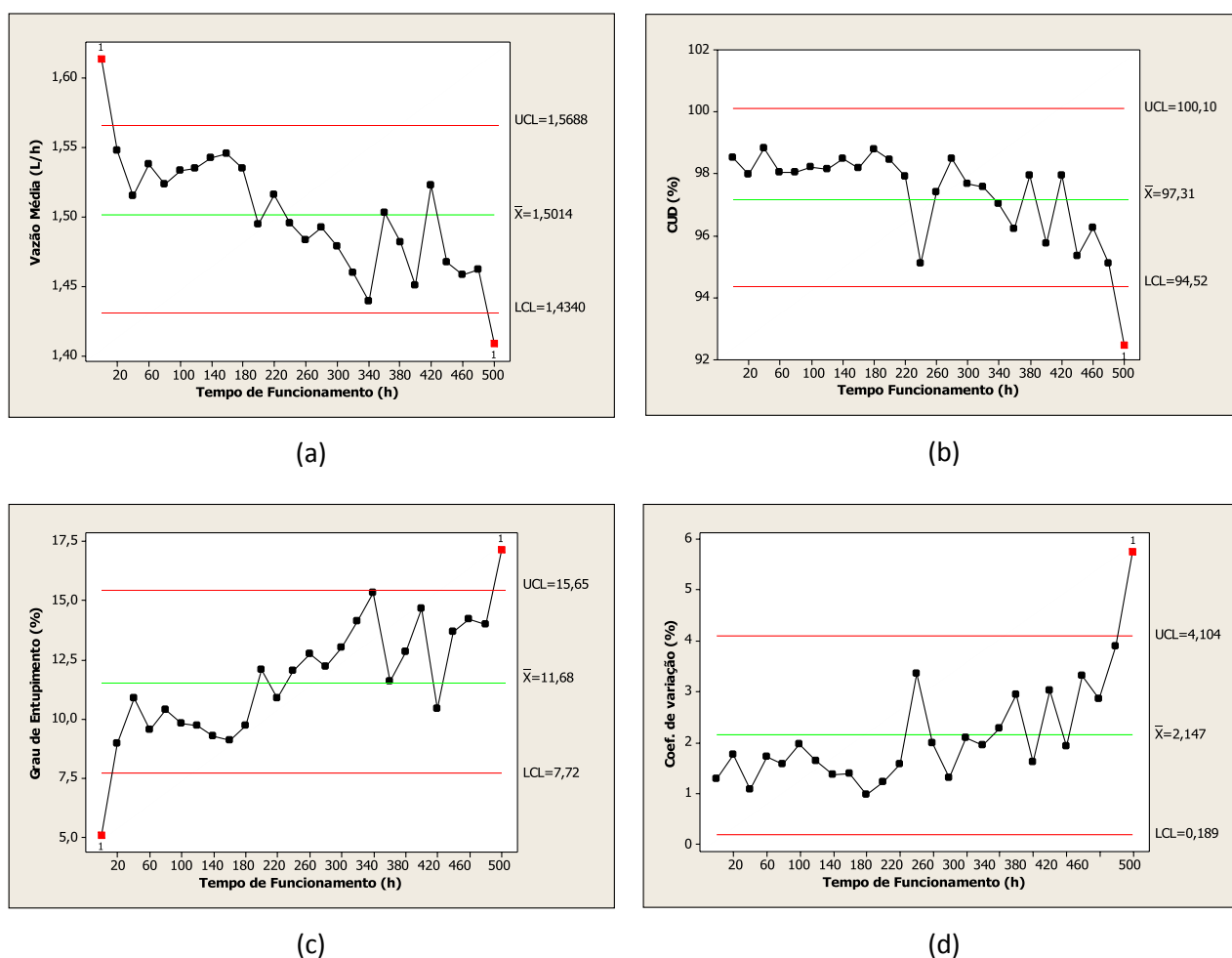
Montgomery (2013) um deslocamento do nível do processo. O deslocamento de nível caracteriza-se por uma sequência de pelo menos sete pontos consecutivos de um dos lados da linha média ( $\bar{X}$ ); este comportamento se remete a um alerta para a probabilidade de falhas no processo que indicam posterior falta de controle. Já o CUD (Figura 10 (b)) apresentou, para às 320 horas, um pico e logo após variações entre a média do processo. Quanto aos valores de CUD, se mantiveram acima dos 90% classificando o sistema de irrigação por gotejamento como excelente de acordo com a classificação de Bralts (1986). Souza et al. (2006), afirmam que a diferença de vazões coletadas e vazões médias pode ser atribuída a gotejadores obstruídos ou à presença de bolsas de ar na parte final das linhas laterais. Pela Figura 10 (c) observa-se que o grau de entupimento a partir das 320 horas de funcionamento começa a apresentar acréscimo indicando problemas de entupimento nos gotejadores. Esse comportamento demonstra que, mesmo com o processo sob controle estatístico (dentro dos limites de controle) a partir das 320 horas deve-se ter maior atenção ao sistema de irrigação por gotejamento embora o grau de entupimento tenha sido considerado baixo. A Figura 10 (d) apresenta a distribuição dos coeficientes de variação (CV) ao longo das 500 horas de funcionamento do sistema de irrigação; observa-se, pela referida figura, que a distribuição no gráfico se manteve dentro do controle do processo, apesar de apresentar um pico às 440 horas ( $CV \approx 6\%$ ). A figura ainda mostra que o CV se encontra dentro do padrão da norma ABNT ISO 9261 (2006) que estabelece valores de CV até 7% para irrigação por gotejamento.



**Figura 10.** Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento e gotejador PCJ (Tratamento AA1)

Na Figura 11 está apresentado o controle estatístico para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento para o gotejador Taldrip. A partir da referida figura observa-se que no sistema de irrigação o processo sai de controle em todos os gráficos (dois ensaios, no caso, da vazão e do GE; um ensaio, no caso de CUD e CVt). Para a Figura 11 (a) o processo sai de controle no primeiro ensaio e no último, vale salientar que no caso do primeiro ensaio o valor da vazão média só está acima do limite superior de controle ( $LSC = 1,5688 \text{ L h}^{-1}$ ) o que não resulta em problema para o sistema de irrigação. Na Figura 11 (c) observa-se o gráfico do grau de entupimento que também apresenta dois ensaios fora de controle; para este caso o menor valor não representa problema para o sistema de irrigação. Para as Figuras 11 (b) e (d) o processo se encontra fora de controle para o último ensaio (500 horas de funcionamento) o que requer preocupação, pois há decréscimo para os indicadores vazão e CUD e acréscimo para os

indicadores de desempenho GE e CVt. É importante ressaltar, ainda, que embora o processo passe a maior parte do tempo sob controle estatístico (dentro dos limites superior e inferior), o gráfico não apresenta comportamento aleatório, o que requer atenção. Na Figura 11 (b) verifica-se que, do ensaio 1 ao 11, todos os valores estão localizados acima do valor médio ( $\bar{X} = 97,31\%$ ) e logo após esse ponto ocorre decréscimo do valor e posteriormente se intercala entre o valor médio até sair do controle do processo, esse comportamento segue um deslocamento do nível do processo, indicando que o processo está fora de controle estatístico. Hermes (2010) observou, estudando o controle estatístico da irrigação localizada com aplicação de diferentes cargas hidráulicas, comportamento semelhante, com 8 ensaios sequenciados acima da linha média, o que promoveu a falta de controle do processo. Isto pode ocorrer, segundo WERKEMA (1995), em virtude de mudanças sistemáticas nas condições ambientais ou em alguma variável dos equipamentos utilizados.

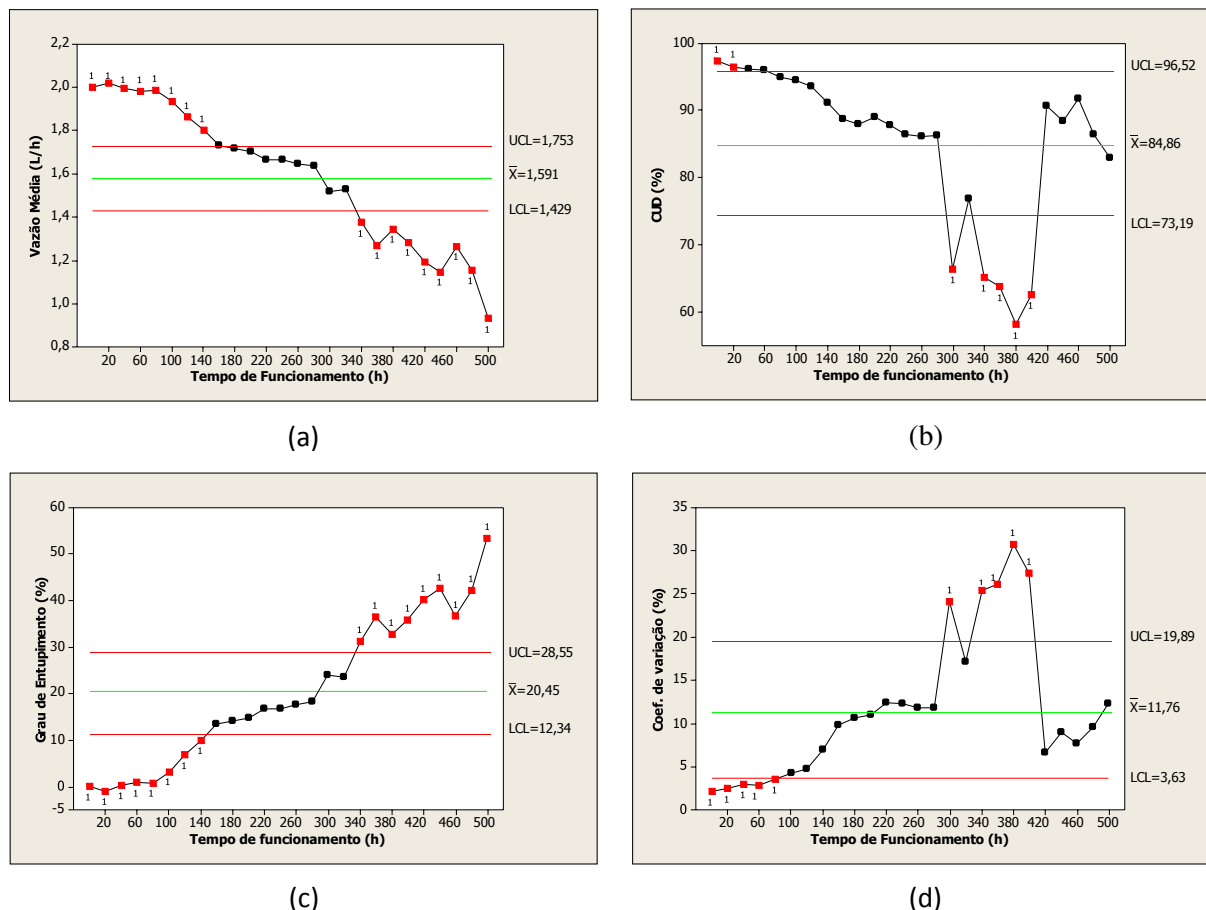


**Figura 11.** Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água de abastecimento e gotejador Taldrip (Tratamento AA2)

Na Figura 12 se encontram as cartas de controle de Shewhart para o tratamento AR1 (sistema de irrigação operando com água residuária tratada e o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica). Nas Figuras 12 (a) e (c) é possível verificar que os pontos plotados nos gráficos apresentam comportamento sistemático decrescente e crescente, respectivamente. Este comportamento indica uma tendência, o que no controle estatístico de um processo, segundo Montgomery (2013) demonstra que o processo está fora de controle e a tendência pode ter diversas causas, entre elas está o desgaste ou deterioração do material. Para a Figura 12 (a) observa-se que o comprometimento no sistema de irrigação por gotejamento se dá a partir do ensaio 18 ao 26, demonstrando queda gradativa da vazão, o que se confirma pela Figura 12 (c) que apresenta, para os mesmos pontos um acréscimo do grau de entupimento no sistema. Ainda, pela Figura 12 (c), nota-se que a partir do ensaio 18 (340 horas) o grau de entupimento para o gotejador modelo PCJ-CNL com saída cilíndrica já é considerado severo, o que contradiz o estudo de Morata et al. (2014) que adotaram, como entupimento severo em gotejadores valores acima de 40%, evidenciando, que a sensibilidade ao entupimento varia entre os diferentes modelos de gotejadores encontrados no mercado, bem como, das condições ambientais do local de estudo.

Na Figura 12 (b) e (d) observa-se tendência decrescente e crescente do ensaio 1 ao ensaio 15, respectivamente. Esses dois gráficos se revelam como espelho, ou seja, quando o CUD decresce o CVt cresce, após o ensaio 15 (280 horas) segue-se de cinco ensaios fora de controle intercalados de um ensaio sob controle estatístico. Puig-Bargués et al. (2005) analisaram o desempenho de três unidades de irrigação por gotejamento dotadas de gotejador não-autocompensante com vazão nominal de  $1,9 \text{ L h}^{-1}$  e operando com esgoto doméstico tratado e verificaram que após 750 h de funcionamento das unidades de aplicação, os valores de CUD foram de 0, 50 e 92% para as unidades de irrigação aplicando efluente secundário filtrado em filtro de discos de  $130 \mu\text{m}$ , efluente secundário filtrado em filtro de tela de  $130 \mu\text{m}$  e efluente terciário filtrado em filtro de tela de  $130 \mu\text{m}$ , respectivamente. Como o sistema de tratamento utilizado nesta pesquisa se trata de um sistema secundário de oxidação da matéria orgânica utilizando o reator UASB, a referida pesquisa condiz com os resultados encontrados já que, para o segundo tratamento a média de CUD foi 50%, na presente pesquisa observa-se, pelo gráfico (Figura 12 b) que entre 340 e 400 horas a uniformidade esteve abaixo de 65%, resultado próximo ao encontrado por Puig-Bargués

et al. (2005); ressalva-se que após este tempo de funcionamento ocorreu um acréscimo do CUD o que pode ter ocorrido devido ao deslocamento do biofilme no interior e nas paredes do gotejador em razão do movimento turbulento do efluente dentro do conduto.

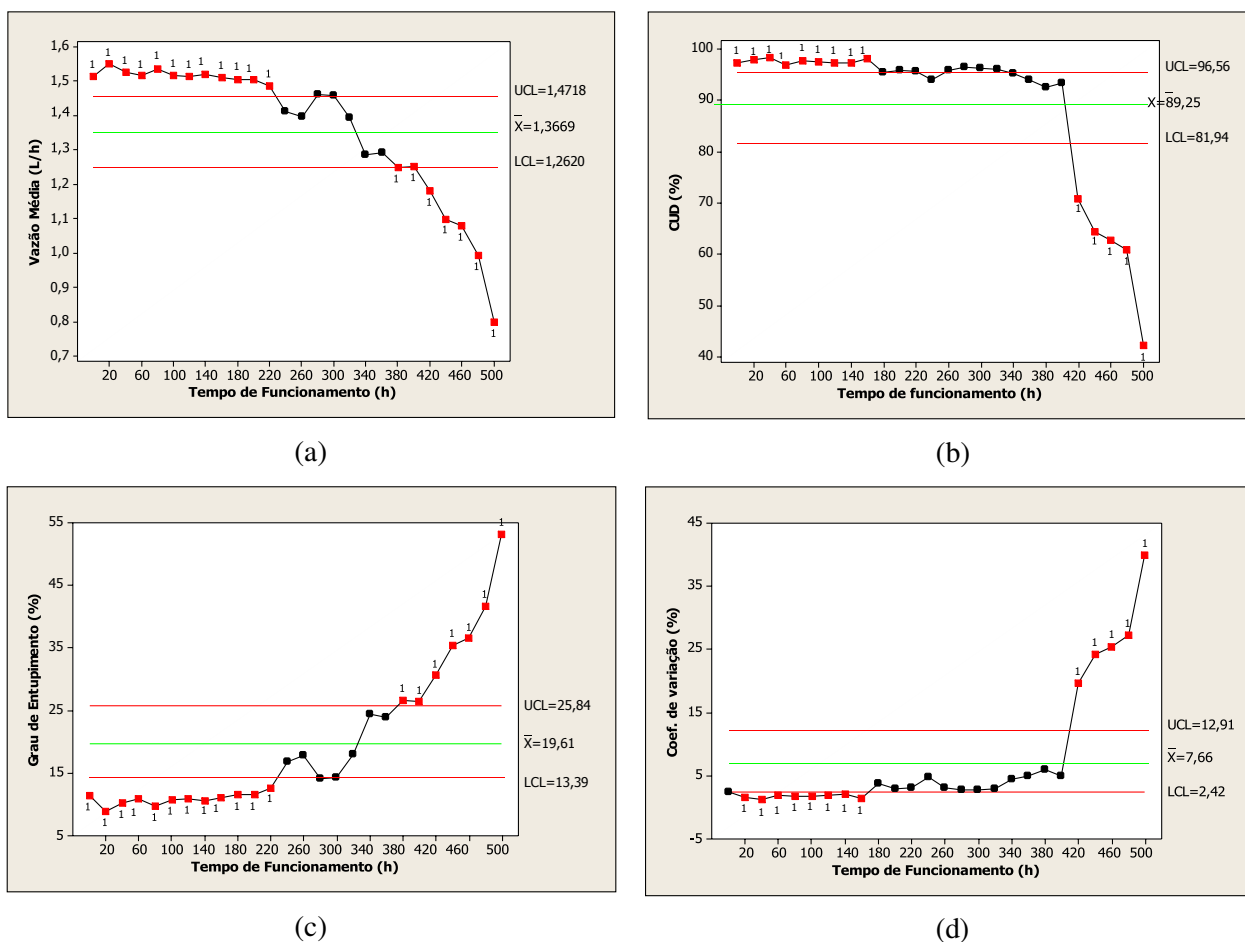


**Figura 12.** Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água residuária e com o gotejador PCJ-CNL com saída cilíndrica (Tratamento AR1)

Na Figura 13 se encontram as cartas de controle de Shewhart para o tratamento AR2 (sistema de irrigação operando com água residuária tratada e o gotejador Taldríp). Semelhante à Figura 12, observa-se um comportamento sistemático de tendência, cujos valores representados nos gráficos (a) e (c) e, (b) e (d) se comportam como espelho um do outro, ou seja, quando ocorre acréscimo para um, ocorre decréscimo para o outro, respectivamente. É possível verificar, para esse tratamento (Figura 13 (a) e (c)) que o comprometimento quanto à qualidade da irrigação começou a ocorrer de forma acentuada às 380 horas de funcionamento (ensaio 20), quando os pontos começam a sair do controle estatístico do processo, observando-se ainda, pela Figura 13 (c) que o grau de entupimento torna-se severo a partir de aproximadamente 26% demonstrando que



não há um comportamento uniforme para todos os tipos de gotejadores; já os gráficos da Figura 13 (b) e (d) passaram a demonstrar problemas mais acentuados a partir das 420 horas de funcionamento ocorrendo um decréscimo da uniformidade e um acréscimo do coeficiente de variação.

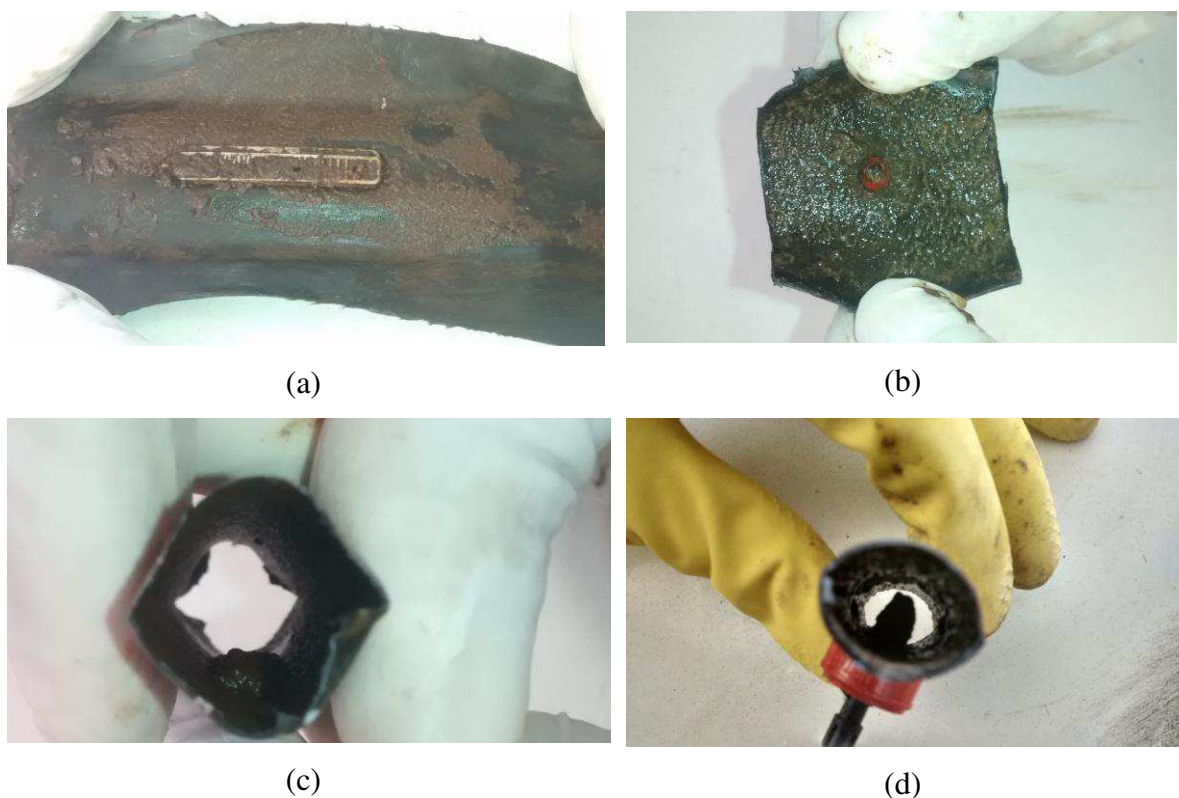


**Figura 13.** Controle Estatístico dos indicadores de desempenho para o sistema de irrigação operando com água residuária e com o gotejador Taldrisp (Tratamento AR2)

Analisando as Figuras 12 e 13, observa-se que o monitoramento através do controle estatístico demonstrou melhor resultado para o sistema de irrigação operando com o gotejador modelo Taldrisp (não-compensante); desta forma, se verifica que mesmo com o mecanismo de compensação o modelo PCJ-CNL com saída cilíndrica apresenta maior sensibilidade com relação ao uso de efluente nos sistemas de irrigação por gotejamento.

A Figura 14 “a” e “b” evidencia a diferença entre os modelos de gotejadores utilizados nesta pesquisa, mostrando que para o uso de efluente, a arquitetura do gotejador é mais importante do que seu mecanismo de compensação devido à passagem

do efluente por eles está influenciada pela maneira com que este passa pelo gotejador. Na Figura 14 “c” e “d”, está detalhado o diâmetro de passagem para os diferentes gotejadores adotados nesta pesquisa, fica nítido que o gotejador autocompensante (Figura 14 d) produz na linha lateral uma perda de carga maior que para a fita gotejadora (Figura 14 c) devido à obstrução da linha lateral favorecida pela inserção do botão gotejador, fazendo com que haja uma oportunidade maior para a criação do biofilme nas paredes e ao redor do gotejador visto que nessa região ocorre perda de velocidade localizada no conduto.



**Figura 14.** (a) Fita gotejadora Taldrip após 500 horas de uso com água residuária tratada; (b) Gotejador PCJ- CNL com saída cilíndrica após 500 horas de uso com água residuária tratada; (c) detalhe do diâmetro de passagem do efluente no sistema de irrigação operando com a Fita gotejadora Taldrip; (d) detalhe do diâmetro de passagem do efluente no sistema de irrigação operando com o Gotejador PCJ- CNL com saída cilíndrica

### 4.3 Qualidade de água e sua relação com o risco a entupimento dos gotejadores

A partir da análise dos parâmetros do efluente tratado (Tabela 10) e se comparando com os valores que constam na literatura (Tabela 3) verifica-se que não havia nenhuma restrição de uso quanto aos sólidos suspensos para o tempo de

funcionamento de 60 e 80 horas, devido seu resultado ter sido muito baixo ( $8 \text{ mg L}^{-1}$ ). Já os sólidos totais dissolvidos (STD) apresentaram grau de restrição moderado para todas as amostras analisadas. O pH apresentou, para todas as amostras, um grau de restrição severa do uso deste efluente em sistemas de irrigação por gotejamento.

**Tabela 10.** Parâmetros químicos e biológicos de qualidade do efluente tratado em cinco diferentes tempos de funcionamento do sistema de irrigação por gotejamento

<b>Parâmetros/Tempo Funcionamento*</b>	<b>60</b>	<b>180</b>	<b>280</b>	<b>380</b>	<b>480</b>
Sólidos Suspensos (mg/L)	8	-----	-----	-----	-----
pH	8,2	8,9	8,2	8,5	8,5
CE (dS/m a 25°C)	1,239	1,676	1,856	1,818	1,853
Turbidez (uT)	1,1	<b>6,1</b>	<b>8,1</b>	0,5	1,3
Cor, Unidade Hazen (mg Pt-Co/L)	<b>50</b>	<b>75</b>	<b>100</b>	<b>50</b>	<b>70</b>
Dureza em Cálcio (mg/L)	82,4	86	113	108	103,5
Dureza do Magnésio (mg/L)	38,2	46,2	46,5	55,5	62,1
Dureza total (mg/L)	365	407,5	476,3	<b>501,3</b>	<b>517,5</b>
Sódio (mg/L)	172,2	<b>218,6</b>	<b>267,2</b>	<b>201,9</b>	<b>214,9</b>
Potássio (mg/L)	1,7	3,3	3,8	12,5	5,5
Alumínio (mg/L)	0	0	0	0	0,01
Ferro total (mg/L)	0,03	0,08	0,03	0,03	0,05
Alcalinidade em Hidróxidos (mg/L)	0	0	0	0	0
Alcalinidade em Carbonatos (mg/L)	36	84	0	134	0
Alcalinidade em Bicarbonatos (mg/L)	305,6	333	447	275	381
Alcalinidade Total (mg/L)	341,6	417	447	409	381
Sulfato (mg/L)	48,9	24,2	47,3	17,3	17,3
Fosforo Total (mg/L)	0	0	0	0	0,1
Cloreto (mg/L)	237,9	<b>308,9</b>	<b>395,8</b>	<b>397,6</b>	<b>420,7</b>
Nitrato (mg/L)	3,37	9,88	5,67	0,09	5,23
Nitrito (mg/L)	0,81	<b>1,12</b>	<b>1,09</b>	0,01	<b>1,59</b>
Amônia (mg/L)	0,41	<b>6,61</b>	<b>6,6</b>	0,58	<b>4,38</b>
Sílica (mg/L)	7,8	5,4	4,2	8,9	9,1
ILS**	1,09	1,84	1,15	1,57	1,46
STD*** (mg/L)	988,1	<b>1167</b>	<b>1436,5</b>	<b>1218,4</b>	<b>1309,1</b>
Coliformes Totais	$30,37 \times 10^2$	$2,0224 \times 10^3$	-----	-----	-----

\*Os valores dos parâmetros da referida Tabela estão sendo avaliados de acordo com os valores padrão apresentados na Tabela 3, relativa aos valores limites de sensibilidade dos emissores quanto ao seu entupimento de acordo com a classificação de Bucks et al (1979) e de Capra e Scicolone (1998); \*\* Índice de Saturação de Langelier; \*\*\* Sólidos totais dissolvidos

O valor de alcalinidade total encontrada nas amostras ao longo do tempo de funcionamento corresponde em sua maioria, à presença de bicarbonato ( $\text{HCO}_3$ ), o que Ayers e Westcot (1999), afirmam em seus estudos que concentrações de bicarbonato

acima de  $305 \text{ mg L}^{-1}$ , provocam problemas graves quanto a precipitados no sistema de irrigação, ressalva-se que apenas para o tempo de funcionamento de 380 horas o valor da alcalinidade em bicarbonatos esteve abaixo desse valor, o que indica que a partir do referido tempo de funcionamento iniciou-se o processo de obstrução dos emissores pela precipitação do bicarbonato, incrustando nas paredes dos condutos e no interior dos emissores. Reafirmando esta ideia tem-se o Índice de Saturação de Langelier (ILS) que, para todas as amostras, apresentou valores acima de zero, demonstrando para os sistemas de irrigação por gotejamento, o risco de ocorrer precipitação de carbonato de cálcio ocasionando incrustações nas paredes das linhas condutoras de água e gotejadores obstruindo assim, a passagem da água pelos condutos.

Ainda se observa, na Tabela 10, que o pH de todas as amostras apresentou valores acima de 8,0 indicando de acordo Bucks et al. (1979) risco severo ao entupimento. Fernandes et al. (2009) avaliaram a qualidade físico-química das águas utilizadas no perímetro urbano irrigado Cachoeira II e Serra Talhada no estado de Pernambuco e obtiveram médias situadas na faixa entre 6,5 a 8,4. Silva Junior e Medeiros (2007) encontraram, aplicando água oriunda de poços arenítico e calcário, respectivamente, médias de 8,0 e 7,1; as pesquisas citadas apresentam médias relativamente próximas às obtidas no presente estudo.

Quanto à população bacteriana, segundo Bucks et al (1979), para os tempos de funcionamento de 60 (3037 UFC) e 180 horas (2022,4 UFC) a restrição ao uso do efluente quanto ao entupimento dos emissores é de menor risco. Os valores de amônia encontrados nas análises do efluente indicam a presença de nitrogênio, que é um nutriente suplementar (reafirmando o suporte nutricional que possui os efluentes domésticos) para as culturas além do potássio que, apesar de apresentar valores relativamente baixos, pode vir a interferir indiretamente no processo de entupimento dos gotejadores, pois esses nutrientes também contribuem para o crescimento de bactérias, criando assim, mucilagem e o biofilme nos gotejadores ao longo das linhas laterais.

Dazhuang et al. (2009) avaliaram a formação de biofilme com a aplicação de efluente doméstico com uma faixa de pH entre 8,04 a 8,21, classificando-a como de risco severo ao entupimento em sistemas de irrigação por gotejamento. Tal estudo apresenta características semelhantes com relação ao parâmetro pH da presente pesquisa revelando que este resultado pode influenciar, de forma acentuada, a formação de biofilme sobre os gotejadores.

## 5 CONCLUSÕES

A partir da aplicação de técnicas de controle estatístico foi possível monitorar os sistemas de irrigação por gotejamento em condições de bancada observando, para os tratamentos com água de abastecimento, que os sistemas de irrigação apresentaram excelente resposta mantendo-se dentro do controle estatístico para a maior parte do período estudado.

Para os tratamentos com o sistema de irrigação por gotejamento operando com água residuária tratada observou-se falta de controle do processo a partir de 340 horas (PCJ-CNL com saída cilíndrica) e 380 horas (Taldrip) de funcionamento, provocando um grau de entupimento de aproximadamente 30% e 26%, respectivamente. Recomenda-se, assim, que para os emissores estudados a sensibilidade ao entupimento ocorre a partir de 30%; neste caso, para o GE acima de 30% a restrição é severa.

Nos tratamentos com uso de água de abastecimento os indicadores de desempenho (vazão, CUD, GE e CVt) se mantiveram em níveis variando de excelente a bom.

A partir desse estudo foi possível verificar que o indicador de desempenho que melhor representa o problema de entupimento nos sistemas de irrigação por gotejamento, é o grau de entupimento.

A qualidade da água de irrigação apresentou características químicas para alguns elementos (bicarbonato, carbonato de cálcio, pH, ILS) preocupantes, variando entre graus moderado a severo, quanto ao risco de entupimento.

A partir das análises da qualidade do efluente verificou-se que o índice de saturação de Langelier (ILS) é um parâmetro importante para ser avaliado devido ao risco a incrustações nas paredes das linhas condutoras de água e no interior dos próprios gotejadores.

No controle estatístico do processo o sistema de irrigação operando com o gotejador modelo PCJ-CNL com saída cilíndrica, mostrou-se mais sensível ao entupimento não tendo mantido o mecanismo de compensação durante todo o seu tempo de funcionamento quando operando com água residuária tratada, evidenciando que para sistemas de irrigação por gotejamento operando com efluente é mais relevante o desenho arquitetônico do gotejador do que o mecanismo de compensação.

O controle estatístico de qualidade do processo mostrou-se uma ferramenta de grande valia para o monitoramento de sistemas de irrigação por gotejamento, sendo imprescindíveis maiores estudos sobre o assunto visando obter maior aperfeiçoamento dessa técnica.

## 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADIN, A.; SACKS, M. Dripper-clogging factors in wastewater irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, New York, v. 117, n. 6, p. 813-826, 1991.

AGÊNCIA NACIONAL DAS ÁGUAS – ANA. **Relatório de conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**. Brasília, 2009. Disponível em: <<http://www.agsolve.com.br/noticia.php?cod=1929>>. Acesso em: 30 mar. 2013.

AHMED, B. A. O.; YAMAMOTO, T.; FUJIYAMA, H.; MIYAMOTO, K. Assessment of emitter discharge in microirrigation system as affected by polluted water. **Irrigation Drainage System**, v. 21, p. 97-107, 2007.

AMORIM, J. R. A. et al. Qualidade da água na agricultura irrigada. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo da irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 255-316.

AIROLDI, R. P. S. **Eficiência dos meios filtrantes disco e manta sintética não tecida em fertirrigação por gotejamento**. Campinas, 2003. 189p. Dissertação (Mestrado Engenharia Agrícola) Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas.

AMERICAN SOCIETY FOR AGRICULTURAL ENGINEERING: ASAE – **ASAE EP405.1 APR1988 (R2008)**. ASABE Standards 2008.

ANDRADE, L. O. **Utilização de água residuária e adubo orgânico na cultura do crisântemo**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campus I, 2008. Campina Grande: Paraíba, 2008. 128p.

ALBUQUERQUE, P. E. P. Manejo da irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 17-24, 2010.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A Qualidade da Água na Agricultura**. Tradução: H. Gheyi e J.F. de Medeiros. Campina Grande, PB. (Tradução de: Water Quality for Agriculture) FAO, Rome. 1999.

\_\_\_\_\_. **Water quality for agriculture**. 3rd ed. Rome: FAO, 1994. 174 p. (Irrigation and Drainage. Paper, 29).

ANDRADE, C. L. T.; BORGES JÚNIOR, J. C. F. B. Seleção do método de irrigação. In: ALBUQUERQUE, P. E. P.; DURÃES, F. O. M. **Uso e manejo da irrigação**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2008. p. 317-400.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **ABNT NBR ISO 9261. 2006**. Equipamentos de irrigação agrícola – Emissores e tubos emissores – Especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro. 17p.

APHA, AWWA, WPCF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21 ed. Washington: D.C: American Public Health Association. 2005.

AZEVEDO, H. M. Irrigação localizada. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 12, n. 139, p. 40-53, jul. 1986.

BASTOS, R. K. X. Fertirrigação com águas residuárias. In : FOLEGATTI, M. V. (Coord.) **Fertirrigação - citrus, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p.279-291.

BATISTA, R. O.; OLIVEIRA, R. A.; SANTOS, D. B.; MESQUITA, F. O.; SILVA, K. B. Sensibilidade ao entupimento de gotejadores operando com água residuária de suinocultura. **Water Resources Irrigation Menagement**, v.2, n.1, p. 19-25, 2013.

BATISTA, R. O.; SOUZA, J. A. R.; FERREIRA, D. C. Influência da aplicação de esgoto doméstico tratado no desempenho de um sistema de irrigação. **Revista Ceres**, v.57, p.18-22, 2010.

BATISTA, R. O.; SOARES, A. A.; MATOS, A. T.; MANTOVANI, E. C. Influência da aplicação de esgoto sanitário tratado no desempenho de um sistema de irrigação por gotejamento montado em campo. **Acta Scientiarum. Technoogyl**, v. 28, n. 2, p. 213-217, 2006.

BERNARDO, M. M. P.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7. ed. Viçosa: UFV, 2005. 711 p.

BRALTS, V. F. **Field performance and evaluation**. In: NAKAYAMA, F. S.; BUCKS, D. A. (Ed). *Trickleirrigation for cropproduction*. Amsterdam: Elsevier. p. 216-240, 1986.

BRANDAO, L. P.; MOTA, S.; MAIA, L. F. Perspectivas do Uso de Efluentes de Lagoas de Estabilização em Irrigação. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002, Vitória, ES. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 2002.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; NUCCI, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. São Paulo: Prentice Hall, p. 72-122, 2002.

BRASIL. Fundação Nacional de Saúde - FUNASA. Manual de saneamento. 3. ed. rev. - Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2006.

BOSCO, T. C. D. **Poluição difusa decorrente da aplicação de água residuária da suinocultura em solo cultivado com soja sob condições de chuva simulada UEOP**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2007. Cascavel: Paraná, 2007. 128p.

BORGES, R. C.; FERREIRA, E. B.; OLIVEIRA, M. S. Estudo do padrão de não-aleatoriedade seqüência no controle estatístico do processo. **Symposium**, Lavras, v. 6, n. 2.P. 31-35, 2008.



- BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S.; GILBERT, R. G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 2, p. 149-162, 1979.
- BLUM, J. R. C. Critérios e padrões de qualidade da água. In: MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. das. **Reúso de água**. Barueri: Manole, 2003. p. 125-174.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. **Journal of Agricultural Engineering Research**, London, 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, p. 135-149, 2004.
- CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal oh Cleaner Production**, v. 15, p. 1529-1534, 2007.
- COSTA, A. F. B.; EPPRESCHT, E. K.; CARPINETTI, L. C. R. **Controle estatístico de qualidade**. São Paulo: Atlas, 2004.
- COSTA, É. T. et al. Métodos e sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 259, p. 7-16, 2010a.
- CHEN, K. S.; HSU, C. H.; WU, C. C. Process capability analysis for a multi-process product. Taiwan. Int. **Journal Manuf. Technol.**, United Kingdom, n.27, p. 1235-1241, 2006.
- CHRISTIANSEN, J. E. **Irrigation by sprinkling**. Berkely: University of California, Experiment Station, 1942. 124 p.
- CUNHA, F. N.; OLIVEIRA, R. C.; SILVA, N. F.; MOURA, L. M. F.; TEIXEIRA, M. B.; GOMES FILHO, R. R. Variabilidade temporal da uniformidade de distribuição em sistema de gotejamento. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.7, n. 4, p. 248 - 257, 2013.
- DAZHUANG, Y.; ZHIHUI, B.; ROWAN, M.; LIKUN, G.; SHUMEI, R.; PEILING, Y. Biofilm structure and its influence on clogging in drip irrigation emitters distributing reclaimed wastewater. **Journal of Environmental Sciences**, v. 21, p. 834-841, 2009.
- DENICULI, W.; BERNADO, S.; THIEBAUT, J. T. L. Uniformidade de distribuição de água em condições de campo num sistema de irrigação por gotejamento. **Revista Ceres**, Viçosa-MG, V.27, N.150. p.155-162. 1980.
- DUARTE, A. S. **Reuso de água residuária tratada na irrigação da cultura do pimentão (*Capsicum annun L.*)**. Tese (Doutorado em Agronomia). Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2006. Piracicaba: São Paulo, 2006. 187 p.

- FALLADOR, F. A. C.; VILAS BOAS, M. A.; MALMANN, L.; SCHOENHALS, M.; VILLWOCK, R. Controle de Qualidade da Água medido Através de Cartas de Controle de Shewhart, CUSUM e MMEP. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 9, n.3, p. 183 – 197, jul/set 2012.
- FARAZ, A.; CHALAKI, K.; MOGHADAM, M. B.. On the properties of the hotelling's T2 control chart with variable sampling intervals. **Quality and Quantity**, v. 24, p. 579-586, 2011.
- FERREIRA, D. F. **Programa de análises estatísticas, statistical analysis software, e planejamento de experimentos, SISVAR 5.0, build 67**. Lavras: UFLA, 2003. Software.
- FERNANDES, J. G.; FREIRE, M. B. G. S.; CUNHA, J. C.; GALVÍNCIO, J. D.; CORREIA, M. M.; SANTOS, P. R. Qualidade físico-química das águas utilizadas no perímetro irrigado Cachoeira II, Serra Talhada, Pernambuco. **Ciências Agrárias**, Recife. v. 4, n. 1, p. 27-34, 2009.
- GIL, M. RODRIGUES-SINOBAS, L. JUANA, L. SANCHEZ, R. LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-application uniformity. **Irrigation Science**. Madrid, v. 26, n. 6, p. 451-458. 2008.
- GILAAD, Y.; KRISTAL, L.; EANKER, K. Hydraulic and mechanical properties of drippers. International Drip Irrigation Congress, 2, **Proceedings...** San Diego: University of California, v.2, p.311-316, 1974.
- GUIDOLIN, J. C. **Reúso de Efluentes**. Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, Ministério do Meio Ambiente, 2000.
- HARUVY, N. Agricultural reuse of wastewater: nation-wide cost-benefit analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 66, p.133-119, 1997.
- HARUVY, N. Wastewater reuse – regional and economic considerations. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v.23, p.57-66, 1998.
- HERMES, E. **Efeito da carga hidráulica e qualidade de água na uniformidade de sistema de irrigação por gotejamento**. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2010. Cascavel: Paraná, 2010.
- HERNÁNDEZ, R. H. **Controle estatístico de processo aplicado na uniformidade da irrigação e fertirrigação por gotejamento**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Campus de Cascavel, 2010. Cascavel: Paraná, 2010.
- HESPANHOL, I. **Potencial de reúso de água no Brasil: agricultura, indústria, município e recarga de aquíferos**. In: Mancuso, C. S. A.; Santos, H. F. (Editores). Reúso de água. Barueri, SP: Manole. p. 37-95, 2003.

HUSSAIN, I.; RASCHID L.; HANJRA, M. A.; MARIKAR.; VAN DER HOEK, W. Wastewater use in agriculture: Review of impacts and methodological issues in valuing impacts. **International Water Management Institute**. 2002. 62 p. Working Paper 37.

INFANTE, P.; DIAS, J. R. Carta X com Amostras de Tamanho Variável: Um Novo Procedimento Dinâmico. **Investigação Operacional**, Lisboa, v. 26, n. 1, p.45-63, 2006.

JUSTI, A. L.; VILAS BOAS, M. A.; SAMPAIO, S. C. índice de capacidade do processo na avaliação da irrigação por aspersão. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 2, p. 264-270, 2010.

LAMM, F. R.; CAMP, C. R. **Subsurface drip irrigation**. In: Microirrigation for crop production. Elsevier B. V. 2007. 642 p.

LANGELIER, W. F. The analytical control of anticorrosion water treatment. **Journal American water works Association**, Denver, v. 28, p. 1500-1521, 1936.

LÉON, G. S.; CAVALLINI, J. M., **Tratamento e uso de água residuária**. Tradução de H.R. Gheyi, A. Konig, B.S.O. Ceballos, F.A.V. Damasceno, UFCB, Campina Grande-PB, 1999.

LI, Y. K.; LIU, Y. Z.; LI, G. B.; XU, T. W.; LIU, H. S.; REN, S. M.; YAN, D. Z.; YANG, P. L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. **Irrigation Science**, 2011.

LIMA, M. M. **Desempenho de diferentes tipos de mantas sintéticas não tecidas na filtração da água para irrigação localizada**. 1999. 79 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LIMA, V. L. A. **Reúso de Água para Irrigação em Zonas Áridas**. In: Manejo e Sustentabilidade da Irrigação em Regiões Áridas e Semi-áridas. UFRB, 2009. Cap 6, p. 145-162.

LIMA, V.L.A. de; FARIAS, M.S.S. de; DANTAS NETO, J. **Impactos Ambientais causados com a irrigação**. In: Valnir Júnior, V. Org. Tecnologia na irrigação. organizadores. Fortaleza: Setor de Reprografia do IFCE, 2010. p.259-289.

LOUIE, M. J.; SELKER, J. S. Sprinkler head maintenance effects on water application uniformity. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Newark, v. 126, n. 3, p. 142-148, 2000.

LMRS/PB. **Laboratório de Meteorologia, Recursos Hídricos e Sensoriamento Remoto da Paraíba**. 2007.

MANCUSO, P. C. S.; SANTOS, H. F. **Reúso de Água**. São Paulo: Editora Manole, 2003. 576p.

MARCIANO, C. R.; MORAES, S. O.; OLIVEIRA, F. C.; MATTIAZZO, M. E. Efeito do lodo de esgoto e do composto de lixo urbano sobre a condutividade hidráulica de um Latossolo Amarelo saturado e não saturado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p.1-9, 2001.

MICHEL, R.; FOGLIATTO, F. S. Projeto econômico de cartas adaptativas para monitoramento de processos. **Revista Gestão & Produção**, São Paulo, v. 9, n. 1, p. 17-31, 2002.

MINITAB. **Statistical Software English**. Minitab 15.1.1.0. State College, 2007.

MONTGOMERY, D. C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução: Farias, A. M. L.; Flores, V. R. L. F.; Laurencel, L. C., 4. ed. – [Reimpr.] – Rio de Janeiro: Editora LTC, 2013.

\_\_\_\_\_. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. Tradução: Farias, A. M. L.; Flores, V. R. L. F.; Laurencel, L. C., Rio de Janeiro: Editora LTC, 2004.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. **Irrigação: princípios e métodos**. 2. ed., atual e ampliado. Viçosa, MG: UFV, 2009. p. 355.

MORATA, G. T.; DANTAS, G. F.; DALRI, A. B.; PALARETTI, L. F.; FARIA, R. T.; SANTOS, G. O. Entupimento de gotejadores com uso de efluente de esgoto sob dois sistemas de filtragem. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.8, n. 2, p. 86 - 97, 2014.

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

\_\_\_\_\_. Emitter clogging effects on trickle irrigation uniformity. **Transactions of the ASAE**, v.1, p.77-80, 1981.

\_\_\_\_\_. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. 164 p.

KAHRAMAN, C.; KAYA, I. Fuzzy process capability indices for quality control of irrigation water. **Stoch Environ Res Risk Assess**, n. 23, p. 451–462, 2009

KELLER, J. e KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. *Transactions of the ASAE, St. Joseph*, v.17, n.4, p.678-84, 1974.

OLIVEIRA, F. G. et al. Avaliação de sistemas de irrigação. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 31, n. 249, p. 43–49, 2010.

PEARN, W. I.; LIN, P. C. Measuring process yield base don the capability index Cpm., **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Londres, v. 24, n. 7, p. 503-508, 2004.

PESCOD, M.D. **Wastewater treatment and use in agriculture**. Rome: FAO, 1992. 125p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 47).

PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. de. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents. **Agricultural Water Management**, v.77, p.249-262, 2005.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF) goteo, microaspersión, exudación**. 3.ed. Madri: Mundi Prensa, 513 p., 1996

QUINTO, A. C. Potencial de uso e reúso de água no Brasil e experiências estrangeiras. **Revista DAE**, n. 180, p.10-11, 2009.

PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. Hydraulic performance of drip irrigation subunits using WWTP effluents. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 77, n. 1-3, p.249-262, 2005.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SHISHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimer wastewater. **Irrigation Science**, New York, v. 13, n. 3, p. 129-139, 1992.

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

RIBEIRO, T. A. P.; PATERNIANI, J. E. S.; AIROLDI, R. P. S.; SILVA, M. J. M. O efeito da qualidade da água no entupimento de emissores e no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 2, p. 136-149, 2004.

RIBEIRO, T. A. P.; AIROLDI, R. P. S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M. J. M. Variação dos parâmetros físico, químicos e biológicos da água em um sistema de irrigação localizada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 3, p. 295-301, 2005a.

\_\_\_\_\_. Efeito da qualidade da água na perda de carga em filtros utilizados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 1, p. 1-6, 2005b.

ROCHA, E. M. M. et al. Uniformidade de distribuição de água por aspersão convencional na superfície e no perfil do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 2, p. 154-160, 1999.

SANTOS, J. S. **Cultivo do algodoeiro e seu potencial fitorremediador sob adubação orgânica e irrigação com água residuária**. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Campina Grande, Campus I, 2012. Campina Grande: Paraíba, 2012.

SAMPAIO, S. C.; SILVESTRO, M. G.; FRIGO, E. P.; BORGES, C. M. Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuárias. **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 557-562, 2007.

SILVA, R. P.; SOUZA, F. G.; CORTEZ, J. W.; FURLANI, C. E. A.; VIGNA, G. P. Variabilidade espacial e controle estatístico do processo de perdas na colheita mecanizada do algodoeiro. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 3, p.742-752, 2007.

SILVA JUNIOR, M. J.; MEDEIROS, J. F. Desenvolvimento de obstruções em gotejadores e eficiência do controle usando dois tipos de ácidos. **Irriga**, Botucatu. v. 12, n. 2, p. 185-191, 2007.

SOUZA, G. P.; DOMINGOS FILHO, M.; SAMOHYL, R. W. Aplicação dos conceitos de Controle Estatístico de Processo (CEP) em uma indústria de fundição do Norte Catarinense. **Produção online**, Florianópolis, v. 7, n. 2, p.64-84, 2007a.

SOUZA, L. M.; JÚNIOR, J. I. R.; REIS, G. M.; IDE, M. S. Eficiência dos gráficos de controle xbarra, ewma e cusum. **Eletrônica & Engenharia**, Viçosa, v. 1, n. 1, p. 81-94, 2008.

SOUZA, J. A. R. **Desempenho de microaspersores operando com águas residuárias de avicultura e bovinocultura**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola). Universidade Federal de Viçosa, 2005. Viçosa: Minas Gerais, 2005. 60 p.

SOCOL, O. J.; ULMANN, M. N.; FRIZZONE, J. A. Performance analysis of a trickle irrigation subunit installed in an apple orchard. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 45, n. 4, p. 525–530, 2002.

SCOTT, A.; KNOTT, M. Cluster-analysis method for grouping means in analysis of variance. **Biometrics**, Washington, v. 30, n. 3, p. 507-512, Sept. 1974.

TROOIEN, T. P.; LAMM, F. R.; STONE, L. R.; ALAM, M.; ROGERS, D. H.; CLARK, G. A.; SCHLEGEL, A. J. Subsurface drip irrigation using livestock wastewater: Drip-line flow rates. **Applied Engineering in Agriculture**, v.16, p. 505-508, 2000.

VAN DER HOEK, W.; HASSAN, U. M.; ENSINK, J. H. J.; FEENSTRA, S.; RASCHID-SALLY, L.; MUNIR, S.; ASLAM, R.; ALIM, N.; HUSSAIN, R.; MATSUNO, Y. Urban wastewater: a valuable resource for agriculture. A case study from Horoonabad, Pakistan. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute, 2002. 29 p. (Research Report, 63)

VARGAS, V. C. C.; LOPES, L. F. D.; SOUZA, A. M. Comparative study of the performance of the CUSUM and EWMA control charts. **Computers & Industrial Engineering**, Los Angeles, v. 46, n. 4, p. 707-724, 2004.

VERAS, C. M. dos A. **Apostila Gestão de Qualidade - IFMA**. São Luiz, Maranhão. 2009.

VIEIRA, G.H.S.; MANTOVANI, E.C.; SILVA, J.G.F.; RAMOS, M.M.; SILVA, C.M. Recuperação de gotejadores obstruídos devido à utilização de águas ferruginosas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.8, p.1-6, 2004.

VON SPERLING, M. **Noções de qualidade de água**, In: Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. p. 187, 1996.

WERKEMA, M. C. C. **Ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos**. Belo Horizonte: Werkema Editora, 2006.

\_\_\_\_\_. **Ferramentas da qualidade**: ferramentas estatísticas básicas para o gerenciamento de processos. Belo Horizonte: FCO - UFMG, 1995. 404 p.