

**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em
irrigação com água residuária**

Rogério Pereira da Silva Airoidi

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em Agronomia.
Área de concentração: Irrigação e Drenagem**

**Piracicaba
2007**

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

Rogério Pereira da Silva Airoidi
Engenheiro Agrícola

**Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com
água residuária**

Orientador
Prof. Dr. TARLEI ARRIEL BOTREL

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor
em Agronomia. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem**

Piracicaba
2007

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
DIVISÃO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - ESALQ/USP**

Airoldi, Rogério Pereira da Silva

Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária / Rogério Pereira da Silva Airoldi. - - Piracicaba, 2007.

139 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2007.
Bibliografia.

1. Água para irrigação – Qualidade 2. Águas Residuárias 3. Irrigação por gotejamento 4. Reuso da água I. Título

CDD 631.7

“Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor”

DEDICATÓRIA

A minha família, por contribuir na formação de meus valores e princípios mais nobres, por todo seu apoio, suporte e incentivo nos momentos mais difíceis.

A Deus, por se fazer presente nos caminhos por nós incompreendidos, mas que conduzem à luz, ao amor e a felicidade.

AGRADECIMENTOS

A CAPES pela concessão da bolsa de estudos no programa de doutorado.

Ao Departamento de Engenharia Rural da ESALQ – USP pela estrutura, qualidade e aceite da minha inscrição.

A FAPESP pelo financiamento da pesquisa desenvolvida durante o curso.

Ao SEMAE/Piracicaba pela liberação e colaboração no fornecimento de água residuária para o experimento.

A todas as pessoas que, por suas mãos e idéias, ajudaram a construir este trabalho.

Ao Professor, orientador e amigo Tarlei Arriel Botrel por sua capacidade, criatividade, ensinamentos, sensibilidade e compreensão extremas.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Rural: Marcos Folegatti, Sergio Duarte, Rubens Coelho, Frizzone, Iran e Cruciani, pelos ensinamentos elevados e amizade.

Ao Professor Carlos Tadeu e amigo de curso Tales pelos ensinamentos e consultas estatísticas.

Aos funcionários Hélio, Gilmar, Antonio e Osvaldo sempre presentes e voluntariosos.

Ao Professor José Euclides Paterniani por toda convivência, amizade e ajuda incondicional nos momentos mais transformadores de minha vida.

A Anamaria Duarte, companheira de curso e experimento, pela amizade, apoio e aprendizado durante todo o doutorado.

Ao Professor Claudinei pelo empréstimo de material para o experimento e estreita amizade e convivência.

Ao GPID pela ajuda solícita. Especial agradecimento aos estagiários Gabriel e Ana Luiza.

Aos amigos mais próximos e caros cuja amizade certamente perdurará independentemente do tempo e da distância: Robson, Tadeu, Denis, Miguel, Marcos, Marconi, Rodrigo, Kelte, Hudson, Ralini, Ceres e Euro.

Aos amigos que deixo, com muito pesar, mas certo de que construirão carreiras brilhantes e contribuirão fortemente para a construção de uma sociedade mais justa e solidária, com a força revolucionária da educação.

EPIGRAFE

“O que ocorre com a terra recairá sobre os filhos da terra. O homem não teceu a teia da vida, ele é simplesmente um de seus fios. Tudo o que fizermos ao tecido, fará o homem a si mesmo. (...) Os homens brancos também passarão; talvez mais cedo do que todas as tribos. Contaminem suas camas e uma noite serão sufocados pelos próprios dejetos. Mas quando de sua desapareção, vocês brilharão intensamente, iluminados pela força do Deus que os trouxe a esta terra e por alguma razão especial lhes deu o domínio sobre a terra e sobre o homem vermelho.” (Carta do Chefe Indígena Seattle, 1854).

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
LISTA DE TABELAS	11
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	15
1 INTRODUÇÃO.....	17
2 DESENVOLVIMENTO.....	21
2.1 Considerações gerais sobre reuso de água na agricultura.....	21
2.2 Reuso de águas no Mundo.....	25
2.3 Aspectos técnicos do uso de águas residuárias em sistemas de irrigação	28
2.4 Aspectos econômicos do uso de águas residuárias na irrigação.....	30
2.5 Tratamento de águas residuárias.....	32
2.6 Irrigação por gotejamento.....	33
2.6.1 Qualidade e tratamento da água para irrigação por gotejamento	40
2.6.2 Filtração da água.....	42
2.6.3 Tratamento químico da água	44
2.6.4 Radiação Ultravioleta	46
2.6.5 Uniformidade de aplicação da água.....	48
2.7 Cultivo do pimentão	52
2.8 Material e métodos	53
2.8.1 Local e planejamento experimental.....	53
2.8.2 Montagem e descrição das instalações experimentais.....	54
2.8.2.1 Primeiro experimento	54
2.8.2.2 Segundo experimento	56
2.8.2.2.1 Ensaios e medições realizadas.....	62
2.8.2.2.1.1 Avaliação da qualidade e eficiência dos tratamentos de água.....	62
2.8.2.2.1.2 Monitoramento da uniformidade de distribuição de água às plantas	63
2.8.2.2.1.3 Determinação da produção e componentes de produção do pimentão.....	64
2.8.2.3 Terceiro experimento.....	64
2.9 Resultados e Discussões	66
2.9.1 Resultados do primeiro experimento.....	66
2.9.2 Tamanho efetivo de grãos e coeficiente de desuniformidade da areia utilizada no filtro lento	70
2.9.3 Características físicas do solo.....	71
2.9.4 Resultados do segundo experimento	73
2.9.4.1 Temperatura e umidade relativa do ar no interior e exterior da casa de vegetação.....	73
2.9.4.2 Análises da água e eficiência de remoção dos diversos parâmetros de qualidade analisados	78
2.9.5 Uniformidade de distribuição de água às plantas	91
2.9.6 Tempo de funcionamento e volume aplicado aos tratamentos.....	102
2.9.7 Produtividade e classificação dos frutos.....	104
2.9.8 Resultados do terceiro experimento	119
3 CONCLUSÕES	126
REFERÊNCIAS	128
APÊNDICES	137

RESUMO

Análise do desempenho de gotejadores e da prevenção do entupimento em irrigação com água residuária

O uso de águas residuárias para irrigação vem sendo amplamente estudado e recomendado por diversos pesquisadores em todo o mundo como alternativa viável para atender as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais das plantas e como forma de proteção ambiental. A presente pesquisa teve por objetivo principal avaliar o desempenho de dois tipos distintos de gotejadores, labirinto que é vastamente utilizado em projetos de irrigação e microtubo que possui um custo sensivelmente menor, mas não é tão largamente utilizado. Pretendeu-se ainda avaliar o desempenho de diferentes tratamentos de água residuária, convencionais e alternativos, principalmente quanto à prevenção de entupimento dos emissores: filtração rápida de areia e disco; filtração lenta da água com enriquecimento por injeção de dióxido de carbono e filtração lenta com posterior desinfecção por radiação ultravioleta. Uma quarta parcela de irrigação foi abastecida com água potável, a fim de se comparar o efeito da água residuária na produção da cultura irrigada (pimentão). Objetivou-se também avaliar parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade dos diferentes tipos de água utilizados na irrigação do pimentão e sua produtividade. Foram realizados três experimentos distintos entre maio de 2005 a março de 2006, permitindo a condução de dois ciclos da referida cultura em ambiente protegido, além de ensaios hidráulicos em laboratório e em casa de vegetação. O delineamento experimental empregado foi num esquema fatorial (4 x 2). Foram considerados dois fatores de estudo: tipos de gotejadores (em dois níveis) e tipos de água (em quatro níveis). Após a realização dos 3 experimentos propostos pode-se concluir que: os gotejadores do tipo labirinto e microtubos apresentaram desempenho similares para um intervalo de pressão de serviço entre 90 e 110 kPa; os resultados das análises da água residuária utilizada no segundo experimento comprovaram a viabilidade técnica de seu uso em irrigação por gotejamento e a eficácia dos tratamentos empregados; a filtração lenta apresentou remoção média de sólidos suspensos de 90,2% e 81,8% de turbidez da água, destacando-se na segunda repetição experimental; os métodos de desinfecção da água por ultravioleta e enriquecimento da água com dióxido de carbono apresentaram resultados expressivos na remoção média de *E. coli* e DBO₅ na segunda repetição experimental; o tratamento com radiação ultravioleta removeu 100% das bactérias e reduziu 50,1% a matéria orgânica da água; para as duas repetições experimentais do segundo experimento, não foram observadas diferenças significativas entre os dois tipos de gotejadores, considerando-se os valores de uniformidade estatística (U_s) e uniformidade de emissão (EU) obtidos; em relação aos índices de produtividade do pimentão destacaram-se os tratamentos irrigados com água residuária; pelos resultados obtidos no terceiro experimento, ficou comprovada a maior sensibilidade ao entupimento dos microtubos em relação aos gotejadores do tipo labirinto utilizados nesta pesquisa.

Palavras-chave: Reuso; Gotejamento; Tratamentos alternativos; Qualidade da água

ABSTRACT

Emitter performance analysis and clogging prevention in irrigation with wastewater's use.

The use of wastewater in irrigation systems is becoming widely studied and recommended by many researchers all over the world as a viable alternative to attend water and nutrients plants necessities and to act as an environmental protector. This study was conducted to investigate and evaluate the performance of two kinds of emitters, labyrinth-type that is widely used in irrigations projects and spaghetti tubing that has a lower cost, but is not so used. Also it pretended to evaluate the performance of some wastewater treatments, conventional and alternatives, mainly to prevent emitters clogging: rapid sand filtration plus disc filters; slow sand filtration with dioxide carbon injection on water and slow sand filtration plus ultraviolet radiation disinfection. A fourth subunit was irrigated with potable fresh water to compare the wastewater effect on peppers production. Another subject of the present research was the evaluation of physics, chemical and biological parameters of quality from different kinds of water used on peppers irrigation and its productivity. Three experiments were conducted within 2005 may and 2006 march, allowing the realization of two cycles of the culture inside a greenhouse and some hydraulic tests both in laboratory and in greenhouse. The experimental statistic design was a 4x2 factorial. Two factors were considered: kinds of emitters (in two levels) and different types of water (in four levels). The results of the present study suggested that: labyrinth-type and spaghetti-tubing emitters had similar performance in a pressure range of 90 – 110 kPa; the results of wastewater analyses assured technical viability of its use in drip irrigation systems and good uniformity efficiency of the experimental treatments; slow sand filtration presented 90,2% average removal of suspended solids and 81,8% of water turbidity, detaching on the second phase; both complementary water treatments (UV and CO₂) presented expressive results of average removal of E. coli and DBO₅ in the second phase; ultraviolet radiation reactor removed 100% of E. coli and 50,1% of organic matters on water; there were observed no significant difference between the emitters used in both phases of the second experiment and both Us and EU coefficients; betters levels of production were obtained with the use of wastewater. The third experiment assured the greater clogging sensibility of spaghetti-tubing when compared with labyrinth-type.

Keywords: Reuse; Drip irrigation; Alternative treatments; Water quality; Clogging

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da instalação experimental utilizada no laboratório.....	55
Figura 2 - Esquema da instalação experimental de campo.....	57
Figura 3 - Desenho esquemático do filtro lento.....	60
Figura 4 – Esquema da instalação experimental da última etapa de campo	65
Figura 5 – Curvas vazão-pressão dos microtubos ensaiados.....	67
Figura 6 – Curvas vazão-pressão dos gotejadores tipo labirinto e microtubo com 75 cm de comprimento.....	67
Figura 7 – Variação dos valores do coeficiente de variação de fabricação para cada gotejador em cada pressão de serviço ensaiada.....	69
Figura 8 - Curva de distribuição granulométrica da areia.....	71
Figura 9 - Curva de retenção da água no solo.....	72
Figura 10 - Gráfico das temperaturas máxima e mínima diárias, na primeira repetição.....	73
Figura 11 - Gráfico das temperaturas máxima e mínima diárias, na segunda repetição.....	74
Figura 12 - Gráfico das temperaturas médias diárias, na primeira repetição.....	75
Figura 13 - Gráfico das temperaturas médias diárias, na segunda repetição.....	76
Figura 14 - Gráfico das umidades relativas máxima e mínima diárias, na primeira repetição.....	77
Figura 15 - Gráfico das umidades relativas máxima e mínima diárias, na segunda repetição.....	78
Figura 16 - Gráfico da variação da vazão média de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo.....	94
Figura 17 - Gráfico da variação da vazão média de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo.....	94
Figura 18 - Gráfico da variação da uniformidade estatística (Us) de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo.....	98
Figura 19- Gráfico da variação da uniformidade estatística (Us) de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo.....	98
Figura 20 - Gráfico da variação da uniformidade de emissão (EU) de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo.....	101

Figura 21 - Gráfico da variação da uniformidade de emissão (EU) de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo.....	101
Figura 22 – Gráfico da variação relativa da vazão ao longo do tempo.....	121
Figura 23 – Gráfico do perfil de variação da uniformidade estatística de emissão (Us) ao longo do tempo.....	122
Figura 24– Gráfico do perfil de variação da uniformidade de emissão (EU) ao longo do tempo.....	124
Figura 1A – Vista parcial externa da estufa.....	138
Figura 2A – Vista parcial interna da estufa.....	138
Figura 3A – Vista superior de vaso com tensiômetro.....	138
Figura 4A – Filtros de areia e disco.....	138
Figura 5A – Vista frontal do da caixa de alimentação e do filtro lento.....	138
Figura 6A – Vista superior da caixa de entrada e do filtro lento.....	138
Figura 7A – Sistema de injeção de CO ₂	139
Figura 8A – Reator ultravioleta.....	139
Figura 9A – Detalhe de vaso com gotejador tipo microtubo.....	139
Figura 10A – Detalhe de vaso com gotejador tipo labirinto.....	139
Figura 11A – Detalhe dos frutos de pimentão em desenvolvimento.....	139
Figura 12A – Vista parcial de linha de vasos com plantas de pimentão.....	139

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Produtividade agrícola ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$) possibilitada pela irrigação com esgotos domésticos.....	22
Tabela 2 - Área irrigada total (AT) e área irrigada com água residuária (AR) em diferentes países.....	26
Tabela 3 - Fatores que afetam a escolha do processo de irrigação e as medidas protetivas requeridas quando se utiliza esgoto.....	29
Tabela 4 - Custos diretos para várias alternativas (centavos de dólar americano m^{-3}), para uma escala de tratamento de $10^6 \text{ m}^3 \text{ ano}^{-1}$	32
Tabela 5 - Recomendação da OMS para tratamento de águas residuárias destinadas à irrigação.....	33
Tabela 6 - Classificação dos gotejadores de baixa vazão segundo diâmetro de emissão.....	37
Tabela 7 – Expoente da curva vazão <i>versus</i> pressão “x” para diferentes tipos de emissores.....	38
Tabela 8 - Classificação do coeficiente de variação de fabricação de emissores.....	39
Tabela 9 - Elementos físicos, químicos e biológicos que produzem obstruções nos sistemas de irrigação localizada.....	41
Tabela 10 - Risco potencial de obstruções segundo qualidade da água de irrigação	41
Tabela 11 - Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo a uniformidade estatística (Us) e uniformidade de emissão (EU).....	51
Tabela 12 - Parâmetros físicos, químicos e biológicos da água analisados e métodos de análise.....	63
Tabela 13 – Vazões médias e medidas de dispersão dos dados obtidos a partir de 60 unidades para cada gotejador ensaiado.....	66
Tabela 14 – Equações vazão-pressão para os gotejadores ensaiados em laboratório.....	68
Tabela 15 - Peso retido e peso retido acumulado, em valor absoluto e relativo, em cada peneira.....	70
Tabela 16 - Características granulométricas obtidas para a areia do filtro lento e recomendações de outros autores.....	71
Tabela 17 - Resultados de concentração de sólidos suspensos e turbidez da água na primeira repetição do experimento ($N = 4$).....	80

Tabela 18 - Resultados de concentração de sólidos suspensos e turbidez da água na segunda repetição do experimento (N = 8).....	81
Tabela 19 - Resultados de pH (N = 6), condutividade elétrica (N = 6), e concentrações de ferro total (N = 3) e manganês total (N = 3) da água na primeira repetição do experimento	84
Tabela 20 - Resultados de pH (N = 8), condutividade elétrica (N = 8), e concentrações de ferro total (N = 4) e manganês total (N = 4) da água na segunda repetição do experimento	85
Tabela 21 - Resultados de concentração de <i>E. coli</i> (N = 3) e demanda biológica de oxigênio (N = 4) da água na primeira repetição do experimento	87
Tabela 22 - Resultados de concentração de <i>E. coli</i> (N = 8) e demanda biológica de oxigênio (N = 4) da água na segunda repetição do experimento	90
Tabela 23 - Resultados de vazão para os oito tratamentos ($L h^{-1}$), na primeira repetição experimental.....	92
Tabela 24 - Resultados de pressão de serviço para os quatro tratamentos (kPa), na primeira repetição experimental.....	92
Tabela 25 - Resultados de vazão para os oito tratamentos ($L h^{-1}$), na segunda repetição experimental.....	93
Tabela 26 - Resultados de pressão de serviço para os quatro tratamentos (kPa), na segunda repetição experimental.....	93
Tabela 27 - Resultados de uniformidade estatística (Us, %) para os oito tratamentos, na primeira repetição experimental.....	95
Tabela 28 - Resultados de uniformidade estatística (Us, %) para os oito tratamentos, na segunda repetição experimental.....	96
Tabela 29 - Resultados uniformidade de emissão (EU, %) para os oito tratamentos, na primeira repetição experimental.....	99
Tabela 30 - Resultados uniformidade de emissão (EU, %) para os oito tratamentos, na segunda repetição experimental.....	99
Tabela 31 - Tempo de aplicação de água (TA), tempo dos ensaios de vazão (TE), tempo total de funcionamento do sistema (TF), volume total de água aplicado por planta (VA), volume médio diário aplicado por planta (VD), lâmina total de água aplicada por	

planta (LA), lâmina média diária aplicada por planta (LD) e acréscimo relativo ⁽¹⁾ (AC), para cada tratamento na primeira repetição experimental.....	103
Tabela 32 - Tempo de aplicação de água (TA), tempo dos ensaios de vazão (TE), tempo total de funcionamento do sistema (TF), volume total de água aplicado por planta (VA), volume médio diário aplicado por planta (VD), lâmina total de água aplicada por planta (LA), lâmina média diária aplicada por planta (LD) e acréscimo relativo (AC), para cada tratamento na segunda repetição experimental.....	104
Tabela 33 – Análise de variância para produção por planta, na primeira repetição experimental.....	105
Tabela 34 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para produção.....	105
Tabela 35 – Resultados de produção por planta, na primeira repetição experimental.....	106
Tabela 36 – Resultados do teste de Tukey para produção por planta, na primeira repetição experimental.....	108
Tabela 37 – Análise de variância para o número de frutos por planta, na primeira repetição experimental.....	108
Tabela 38 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para o número de frutos.....	109
Tabela 39 – Resultados do número de frutos por planta, na primeira repetição experimental.....	109
Tabela 40 – Resultados do teste de Tukey para o número de frutos por planta, na primeira repetição experimental.....	110
Tabela 41 – Análise de variância para o peso dos frutos, na primeira repetição experimental.....	110
Tabela 42 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para o peso de frutos.....	111
Tabela 43 – Resultados da variável peso dos frutos, na primeira repetição experimental.....	111
Tabela 44– Análise de variância para o comprimento de frutos, na primeira repetição experimental.....	111
Tabela 45 – Resultados do comprimento de frutos, na primeira repetição experimental.....	112

Tabela 46 – Resultados do teste de Tukey para o comprimento de frutos, na primeira repetição experimental.....	112
Tabela 47– Análise de variância para a largura de frutos, na primeira repetição experimental.....	113
Tabela 48 – Resultados da largura de frutos, na primeira repetição experimental.....	113
Tabela 49 – Análise de variância para produção por planta, na segunda repetição experimental.....	114
Tabela 50 – Resultados da produção por planta, na segunda repetição experimental.....	115
Tabela 51 – Análise de variância para o número de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	116
Tabela 52 – Resultados do número de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	116
Tabela 53 – Análise de variância para o peso dos frutos, na segunda repetição experimental.....	116
Tabela 54 – Resultados do peso dos frutos, na segunda repetição experimental.....	117
Tabela 55 – Análise de variância para o comprimento de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	117
Tabela 56 – Resultados do comprimento de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	118
Tabela 57 – Análise de variância para a variável largura de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	118
Tabela 58 – Resultados da variável largura de frutos por planta, na segunda repetição experimental.....	118
Tabela 59 – Resultados das vazões médias ($Q, L h^{-1}$) para cada tratamento da água	119
Tabela 60 – Resultados da variação relativa (%) da vazão ao longo do tempo.....	120
Tabela 61 – Resultados de uniformidade estatística de emissão ($U_s, \%$) do ensaio de campo de 500 horas.....	122
Tabela 62 – Resultados de uniformidade de emissão ($U_E, \%$) do ensaio de campo de 500 horas.....	123

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ONU – Organização das Nações Unidas

WHO – *World Health Organisation*

CEPIS - Centro Panamericano de Engenharia Sanitária y Ciências del Ambiente

CF – Coliformes Fecais

OMS – Organização Mundial de Saúde

DBO - Demanda Bioquímica de Oxigênio

DQO – Demanda Química de Oxigênio

SST – Sólidos Suspensos Totais

ICID - *International Commission on Irrigation and Drainage*

ASAE - *American Society of Agricultural Engineers*

UV – Radiação Ultravioleta

CEAGESP - Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais de São Paulo

ETE - Estação de Tratamento de Esgoto

AP – Água Potável (tratamento)

FAD – Filtros de Areia e Disco (tratamento)

CO₂ – Dióxido de Carbono (tratamento)

UV – Radiação Ultravioleta (tratamento)

AR – Água Residuária

FL – Filtro Lento

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

DAE – Dias após emergência

M80 – microtubo com 80 cm

M75 – microtubo com 75 cm

M70 – microtubo com 70 cm

DAT – Dias Após Transplântio

LAB – Labirinto (gotejador)

MIC – Microtubo (gotejador)

FD – Filtro de Disco (tratamento)

FD + UV – Filtro de Disco associado ao Reator Ultravioleta (tratamento)

LISTA DE SÍMBOLOS

Q – vazão do emissor, $L h^{-1}$.

K – constante característica do emissor, adimensional.

H – pressão da água, mca.

x – constante que caracteriza o regime de escoamento no emissor, adimensional.

CV_f - coeficiente de variação de fabricação, %.

s – desvio padrão da média de vazão dos gotejadores, $L h^{-1}$.

\bar{q} - vazão média dos gotejadores à determinada pressão e temperatura padrão, $L h^{-1}$.

U_S - uniformidade estatística, %.

cv - coeficiente estatístico de variação de vazão dos emissores, %.

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

EU - uniformidade de emissão, %.

q_{25} - vazão média dos 25% menores valores, $L h^{-1}$.

Q_m – valor médio da vazão obtido no último ensaio de campo, $L h^{-1}$.

Q_t – vazão média de 400 novos emissores submetidos à mesma pressão serviço, $L h^{-1}$.

θ - umidade do solo, $cm^3 cm^{-3}$.

T – tensão de água no solo, Bar.

1 INTRODUÇÃO

O homem utiliza a água para diversas atividades, consuntivas ou não. A escassez deste recurso é um fator limitante ao desenvolvimento econômico e social de uma região, e a multiplicidade de seu uso pode gerar competição e conflitos. A irrigação é reconhecidamente a atividade humana que mais consome água, em média 70% de todo o volume captado (CHRISTOFIDIS, 2001). Em áreas de clima seco a irrigação é responsável pelo consumo de 50 a 85% dos recursos hídricos disponíveis (HANDY, 2001 apud CAPRA; SCICOLONE, 2004). Já no Brasil a agricultura utiliza 61% de todo o volume captado (REBOUÇAS et al., 1999 apud BRITO; COUTO; SANTANA, 2002). Segundo Hespanhol (2003), no Brasil esta porcentagem chega muito próxima de 70%.

Por outro lado, a partir do século XX, com o grande crescimento populacional registrado em todas as regiões do mundo, esta técnica foi de fundamental importância para garantir que a produção de alimentos acompanhasse este crescimento. Segundo Rijsberman (2006), neste século a população mundial triplicou, ao passo que o consumo de água aumentou em seis vezes. Atualmente 18% da área agricultada em todo mundo, cerca de 275 milhões de hectares, é irrigada. Esta mesma parcela é responsável pela produção de 42% dos alimentos consumidos pelo homem (CHRISTOFIDIS, 2002). No Brasil, cerca de 5% da área cultivada é irrigada (aproximadamente 3 milhões de hectares) é responsável por 16% da produção agrícola e representa 35% do valor total da produção (SANTOS, 1998 apud BRITO; COUTO; SANTANA, 2002).

O índice médio mundial de consumo da água para irrigação foi $9.958 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em 1990. Uma década depois, em 2000, houve uma melhoria de 5% na eficiência dos sistemas de irrigação e o índice médio de consumo passou a $9.436 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Estima-se que no ano de 2025 este índice pode chegar a $8.100 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (CHRISTOFIDIS, 2002).

O crescimento populacional demandou uma maior captação de água para o contínuo desenvolvimento das atividades humanas, provocando uma queda na qualidade deste recurso em suas fontes naturais.

Diante deste panorama é clara a necessidade de fazer uso deste recurso natural com maior racionalidade, seja através de técnicas que permitam um aproveitamento mais eficiente da água

nas mais diversas atividades humanas, entre elas a irrigação, seja através da busca de fontes alternativas de água. Segundo Hespanhol (2001), a agricultura depende de suprimento de água a um nível tal, que a sustentabilidade da produção de alimentos não poderá ser mantida sem a adoção de fontes alternativas de suprimento.

A irrigação não pode e não deve competir com o uso da água destinado ao abastecimento doméstico, que sempre será prioridade. Segundo Dourado Neto; Saad e Lier (1991), pela constituição brasileira, a ordem de prioridade do uso da água é a seguinte: consumo humano, indústria e, por fim, agricultura. Assim, as águas utilizadas em irrigação serão cada vez mais escassas e de pior qualidade. Para Hespanhol (2003) a substituição de fontes de água é a alternativa mais plausível para satisfazer as demandas menos restritivas e liberar águas de melhor qualidade para usos mais nobres. Esta realidade demanda uma busca de adaptação das técnicas de irrigação existentes e amplamente difundidas às condições atuais e futuras de escassez de água.

Segundo Brito; Couto e Santana (2002), organizações mundiais tais como a Organização das Nações Unidas - ONU e o Banco Mundial consideram que países que dispõem de pelo menos $2.000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de água não enfrentam problemas de escassez. Em 1998, em um documento apresentado pelo Banco Mundial, constavam 22 países abaixo deste limite, 18 abaixo de $1.000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Previsões recentes apontam que no ano de 2025, cerca de 3 bilhões de pessoas estarão vivendo em países com escassez de recursos hídricos, que terão sérios problemas para produzir seus próprios alimentos (CHRISTOFIDIS, 2002). Segundo Rjisberman (2006), a conclusão de diversos estudiosos deste problema aponta que dois terços da população mundial será afetada pela escassez de água nas próximas décadas. Este problema já é fortemente presente nas regiões central e oeste da Ásia e norte da África, regiões densamente povoadas e com baixa disponibilidade deste recurso natural.

Embora o Brasil possua a maior reserva mundial de água doce, com disponibilidade média de $32.000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, existe problemas regionais de escassez deste recurso. Estes problemas estão relacionados, basicamente, a dois fatores principais: má distribuição espacial da água no território nacional e intensa concentração de populações urbanas. Como consequência, cinco estados brasileiros apresentam disponibilidade média inferior a $2.000 \text{ m}^3 \text{ hab}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e diversas bacias hidrográficas apresentam conflitos pelo uso deste recurso, entre elas: Guaíra (SP), Verde Grande (MG), Paraíba do Sul (SP, MG, RJ), Bom Jardim (GO) e pequenas bacias

localizadas nas zonas semi-áridas da região Nordeste e Sudeste (BRITO; COUTO; SANTANA, 2002). Segundo Hespanhol (2001), existem no Brasil regiões com abundância de recursos hídricos que não são suficientes para atender a alta demanda, como é o caso da região metropolitana de São Paulo que necessita captar água de outra bacia hidrográfica, do Piracicaba-Capivari-Jundiaí, para atender uma população superior a 15 milhões de habitantes.

O uso de águas residuárias para irrigação vem sendo amplamente estudado e recomendado por diversos pesquisadores em todo o mundo como alternativa viável para atender as necessidades hídricas e, em grande parte, nutricionais das plantas e como forma de proteção ambiental (HARUVY, 1997; HESPANHOL, 2001; CAPRA; SCICOLONE, 2004; LONDE; PATERNIANI, 2003; LEON; CAVALLINI, 1999; ORON et al., 1999; entre outros). Hespanhol (2003) alerta que, com poucas exceções como áreas significativas no nordeste brasileiro, a área arável no mundo aproxima-se rapidamente de seus limites de expansão.

Neste contexto, e devido a uma urbanização crescente, o uso de água residuária na agricultura pode ser uma alternativa economicamente atrativa e tecnicamente viável, além de liberar as águas de melhor qualidade para os usos mais nobres, como o abastecimento doméstico.

Além disso, em virtude deste quadro de escassez de água, deve-se optar por métodos de irrigação que façam uso racional deste recurso cada vez mais limitado. A irrigação por gotejamento é reconhecidamente a maneira mais eficiente de aplicação de água às plantas. No entanto, os sistemas de irrigação por gotejamento são muito sensíveis à qualidade da água em função do reduzido diâmetro de emissão dos gotejadores.

Desta forma, para aliar a exploração de fontes alternativas de água para irrigação com sistemas de baixo consumo, devem-se estudar novas alternativas de tratamentos de água para irrigação por gotejamento, eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente seguros para garantir a estes sistemas efluentes de melhor qualidade.

A presente pesquisa teve por objetivo principal avaliar o desempenho de dois tipos distintos de gotejadores, labirinto que é vastamente utilizado em projetos de irrigação e microtubo que possui um custo sensivelmente menor, mas não é tão largamente utilizado, especialmente no Brasil. Pretendeu-se ainda avaliar o desempenho de diferentes tratamentos de água residuária, convencionais e alternativos, principalmente quanto à prevenção de entupimento dos emissores: filtração rápida de areia e disco; filtração lenta da água com injeção de dióxido de carbono e filtração lenta com posterior desinfecção por radiação ultravioleta. Uma quarta parcela

de irrigação foi abastecida com água potável, a fim de se comparar o efeito da água residuária na produção da cultura irrigada (pimentão). Objetivou-se também avaliar parâmetros físicos, químicos e biológicos de qualidade dos diferentes tipos de água utilizados na irrigação do pimentão e sua produtividade.

Foram realizados três experimentos distintos entre maio de 2005 a março de 2006, permitindo a condução de dois ciclos da referida cultura em ambiente protegido, além de ensaios hidráulicos em laboratório e em casa de vegetação. O delineamento experimental empregado foi num esquema fatorial (4 x 2). Foram considerados dois fatores de estudo: tipos de gotejadores (em dois níveis) e tipos de água (em quatro níveis).

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Considerações gerais sobre reuso de água na agricultura

Embora apenas no século XX o reuso de água tenha obtido maior importância, esta prática vem sendo empregada há séculos. Segundo Jefferson et al. (2000) em um dos mais antigos sistemas de engenharia reportados, construído pelo rei Minos de Creta há cinco mil anos, a água da chuva era coletada para ser utilizada para limpeza de banheiros. Outra prática secular de que se tem registro é o uso de efluente de banheiros públicos para irrigação de jardins.

A prática de colocar dejetos humanos e de animais no solo como fertilizante é bastante antiga nos países do sul asiático, principalmente na China. Em épocas remotas, em Atenas, utilizavam-se esgotos para a irrigação e há registros de que durante a Idade Média, empregava-se o reuso na Alemanha e na Escócia (SHUVAL et al., 1985).

A Agenda 21 (1994, apud HESPANHOL, 2003) destaca a importância especial ao reuso da água como forma de proteção ambiental e incentiva a vitalização e ampliação dos sistemas nacionais de reuso e reciclagem dos resíduos (HESPANHOL, 2001). O crescente reuso de efluentes tratados na agricultura visa promover uma atividade sustentável, preservando as escassas fontes de água e mantendo a qualidade do meio ambiente. As áreas metropolitanas produzem excesso de efluentes, enquanto que as áreas periféricas, onde se pratica agricultura, a densidade demográfica é sensivelmente menor. Desta forma, o bombeamento deste excesso para áreas de intensa produção agrícola contribuiria para reduzir os riscos à saúde humana das populações urbanas e de contaminação de aquíferos e corpos d'água superficiais pela disposição direta (HARUVY, 1997).

Hespanhol (2001) afirma que, em função das grandes vazões envolvidas, deve-se atribuir especial atenção à utilização de águas residuárias nas atividades agrícolas, especialmente a irrigação.

O emprego de água residuária na irrigação pode reduzir os custos de fertilização das culturas, bem como o nível requerido de purificação do efluente e, conseqüentemente, os custos de seu tratamento, já que a água residuária contém nutrientes e o solo e as culturas comportam-se como biofiltros naturais (HARUVY, 1997; BRANDÃO; MOTA; MAIA 2002). A estimativa do

valor de nutrientes presentes nos efluentes de lagoas de estabilização na Jordânia é de 75 dólares americanos por 1000 m³ (SAQQAR, 1994 apud AL-NAKSHABANDI et al., 1997). Leon e Cavallini (1999) afirmam que os esgotos tratados constituem-se em adubos naturais para a produção de alimentos, o que possibilita elevar o retorno econômico da atividade, bem como promover a geração local de empregos. Outro aspecto positivo do reuso é a possibilidade da implantação de zonas agrícolas em áreas desérticas, a exemplo do que ocorre em Israel.

Hespanhol (2001) aponta que os benefícios do emprego da técnica de reuso da água são econômicos, ambientais, de saúde pública, e, portanto, sociais, entre 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 em países em desenvolvimento.

Estudo da *World Health Organization* - WHO (1989) cita como vantagens do reuso de águas residuárias a recuperação e a economia de água; o alto poder fertilizante do efluente; a formação de húmus devido a uma mineralização lenta da matéria orgânica, contribuindo para a melhoria das propriedades físicas do solo, como a maior retenção de água; e a redução ou eliminação da poluição ambiental.

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. Entre os benefícios que potencializam maiores retornos econômicos destaca-se o aumento da produtividade, desde que bem administrada a utilização da água residuária (Tabela 1).

Tabela 1 - Produtividade agrícola (Mg ha⁻¹ ano⁻¹) possibilitada pela irrigação com esgotos domésticos

Fonte da irrigação	Trigo	Feijão	Arroz	Batata	Algodão
	8 anos ⁽¹⁾	5 anos ⁽¹⁾	7 anos ⁽¹⁾	4 anos ⁽¹⁾	3 anos ⁽¹⁾
Esgoto bruto	3,34	0,90	2,97	23,11	2,56
Efluente primário	3,45	0,87	2,94	20,78	2,30
Efluente de lagoa de estabilização	3,45	0,78	2,98	22,31	2,41
Água + NPK	2,70	0,72	2,03	17,16	1,70

Fonte: Adaptado de Hespanhol (2001).

⁽¹⁾ número de anos para cálculo da produtividade média.

Efluentes de sistemas convencionais de tratamento, tais como lodos ativados, apresentam concentração de nitrogênio e fósforo em torno de $15,0 \text{ mg L}^{-1}$ e 3 mg L^{-1} , respectivamente. Estes valores podem reduzir, ou até mesmo eliminar a necessidade de aplicação de fertilizantes adicionais. Em um trabalho realizado pelo Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente - CEPIS, segundo Leon e Cavallini (1999), foram avaliadas diferentes doses de adubo e comparadas à aplicação de água residuária tratada sem adição de fertilizantes. Os resultados de produção obtidos para a cultura do feijão mostraram resultados semelhantes em todos os tratamentos, incluindo o tratamento sem fertilização artificial.

Al-Nakshabandi et al. (1997) obtiveram produtividade média de $56,3 \text{ Mg ha}^{-1}$ para a cultura da berinjela irrigada com água residuária, muito acima da média nacional da Jordânia de $28,5 \text{ Mg ha}^{-1}$, com uso de água convencional na irrigação. Além disso, neste experimento verificou-se que as plantas irrigadas com água residuária apresentaram aumento na concentração de todos os nutrientes analisados (P, N, Ca, Mg, Na e K), tanto nas folhas quanto nos frutos, quando comparadas às irrigadas com água comum.

Entre os efeitos potencialmente negativos da utilização de água residuária na irrigação destacam-se:

- Poluição, particularmente por nitratos, de aquíferos subterrâneos utilizados para abastecimento público. Níveis de nitrato em água potável superiores a 90 mg L^{-1} 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 microorganismos patogênicos (bactérias, vírus, cistos de protozoários e ovos de helmintos) presentes nos esgotos (CAPRA; SCICOLONE, 2004).

Para Capra e Scicolone (2006), esgotos domésticos contêm metais pesados e uma ampla variedade de substâncias orgânicas e inorgânicas potencialmente tóxicas. Mas os autores afirmam que o principal problema associado ao uso de águas residuárias na irrigação é o risco à saúde dos trabalhadores e consumidores devido aos microorganismos patogênicos.

Segundo Al-Nakshabandi et al. (1997), os riscos à saúde estão associados com a presença de um amplo espectro de patógenos: *Escherichia coli*, *Salmonella sp.*, *Shigella sp.*, além de ovos de nematóides intestinais.

Pizarro (1996) afirma que o consumo de produtos *in natura* pode ocasionar febre tifóide, cólera, amebíase, ascaridíase, esquistossomose, disenteria, teníase e triquinose.

Contudo, um bom manejo do conjunto solo, água e planta é capaz de mitigar os efeitos negativos potenciais devido ao uso das águas residuárias. Bastos et al. (2002) avaliaram a contaminação de alfaces irrigadas por aspersão utilizando efluentes de três lagoas de estabilização em série, chegando aos seguintes resultados: as alfaces irrigadas com o efluente da terceira lagoa tiveram qualidade bacteriológica semelhante às irrigadas com água de poço (testemunha) e tiveram qualidade superior às comercializadas em feiras livres, sendo plenamente aceitável para comercialização pela legislação brasileira; as alfaces irrigadas com o efluente da segunda lagoa, o qual possuía qualidade inferior à preconizada pela WHO (1989) para irrigação irrestrita, tiveram qualidade bacteriológica próxima do aceitável. Ainda, no referido trabalho, os autores recomendam a busca de resultados adicionais através da repetição de experimentos, utilizando outros tipos de culturas que apresentem contato diferenciado com a água de irrigação e com o solo.

Marouelli e Silva (1998) afirmam que berinjela, tomate e pimentão não devem ser irrigados com água contaminada, mesmo por gotejamento, já que os frutos podem ser facilmente contaminados por respingos provocados pela chuva. Entretanto, este problema é inteiramente anulado no caso de cultivo em ambiente protegido.

Segundo Vargas; Lopez e Mara (1990) existem medidas mitigadoras que devem ser adotadas para reduzir os riscos à saúde, tais como: evitar o cultivo de verduras e utilizar efluentes de alta qualidade (a partir de lagoas de estabilização). No entanto, o grau de tratamento necessário dependerá do uso que se pretende dar aos efluentes.

Assim, Hespanhol (2001) argumenta que a escolha do método de irrigação das culturas é fator decisivo para a minimização dos riscos à saúde de trabalhadores e consumidores. Ampliando este panorama, Shuval (1977 apud DASBERG; BRESLER, 1985) e Katznelson e Teltch (1976 apud DASBERG; BRESLER, 1985) afirmam que, com o emprego da irrigação por gotejamento com água residuária, há redução do risco de formação de aerossóis que possam depositar microorganismos patogênicos na folhagem dos vegetais. Entretanto, estes sistemas, por terem emissores de água de diâmetro reduzido e sujeito ao entupimento por partículas sólidas em suspensão na água, podem ter a eficiência de distribuição de água às plantas reduzida no decorrer de sua utilização. Com a utilização de águas residuárias para a irrigação, o processo de entupimento dos gotejadores pode ocorrer ainda mais prematuramente, sendo fundamental a adoção de tratamentos eficientes, economicamente viáveis e ambientalmente seguros para garantir a estes sistemas efluentes de melhor qualidade.

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.

Embora Hespanhol (2001) afirme que os efluentes tratados devam conter concentrações significativas de matéria orgânica e o máximo possível de nutrientes, devem-se manter níveis de DBO até um valor máximo de 100mg L^{-1} .

2.2 Reuso de águas no Mundo

Leon e Cavallini (1999) citam que, entre outros, Oman, Arábia Saudita, Kuwait, Tunísia, México, Peru, Chile, China, Estados Unidos, Israel, Índia e Argentina, utilizam água residuária para irrigação. De acordo com Abdellah e Ashbolt (2000), nas próximas décadas, existirá uma demanda crescente de reuso de água em várias regiões urbanas do mundo com intuito de satisfazer as pressões ambientais, econômicas e sociais, visto que em algumas comunidades específicas, em razão de seus recursos hídricos limitados, ocorre uma pressão adicional para se praticar o reuso de água.

Em alguns países como China e México, a área irrigada com efluentes tratados é bastante representativa (Tabela 2).

Tabela 2 - Área irrigada total (AT) e área irrigada com água residuária (AR) em diferentes países

País	AT (ha) ⁽¹⁾	AR (ha) ⁽²⁾	AR / AT (%)
China	44.461.000	1.330.000	2,99
México	5.285.000	250.000	4,73
Índia	41.779.000	73.000	0,17
Chile	1.257.000	16.000	1,27
EUA	19.831.000	13.500	0,07
Peru	1.210.000	5.500	0,45
Argentina	1.620.000	3.700	0,23

Fontes: Leon e Cavallini (1999) e Christofidis (2001).

⁽¹⁾ Dado para o ano de 1985.

⁽²⁾ Dado para o ano de 1987.

Verifica-se que a China e o México apresentavam, entre 1985 e 1987, 2,99% e 4,73%, respectivamente, de suas áreas totais irrigadas com água residuária. A China, por sua vez, é o único país que apresentava mais de um milhão de hectares irrigados com efluentes tratados.

Além de possuir 73.000 ha irrigados com efluentes tratados, a Índia possui mais de 70.000 ha de lagoas para criação de peixes, exclusivamente abastecidas por águas residuária.

O México, segundo Hespanhol (2001), apresenta 17 distritos de irrigação com água residuária em 6 estados. O país conta com uma agência vinculada ao Ministério de Agricultura e Recursos Hídricos encarregada do planejamento, administração e controle de todos os sistemas de reuso de água mexicanos.

No Peru, em 1991, o Ministério da Agricultura iniciou um programa nacional de irrigação com água residuária tratada, com o objetivo de ampliar a fronteira agrícola da costa em 18.000 ha irrigados, utilizando $20 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de esgoto produzido nas principais cidades peruanas.

Israel convive com a escassez de água, que é um fator limitante para suas possibilidades de produção agrícola. Neste país a agricultura irrigada consome mais de 65% de todo o efluente produzido anualmente (HARUVY, 1996 apud CAPRA; SCICOLONE, 2004). Estima-se que em 2040, as atividades agrícolas consumirão $1.400 (10^6 \text{ m}^3)$ anualmente, cerca de 40% da demanda total de água do país. Deste total, $1.000 (10^6 \text{ m}^3)$, ou 70%, serão supridos por efluentes tratados (HARUVY, 1997).

Nas regiões áridas do mediterrâneo há grande competição pelo uso da água, ao mesmo tempo em que se observa contínuo aumento da produção de águas residuárias decorrente do crescimento populacional (CAPRA; SCICOLONE, 2004). Tsagaraki; Dialynas e Angekalis.

(2004) afirmam que o aumento da demanda da água para o uso doméstico e agrícola, ocasionado pela variação espacial e temporal das precipitações, aumento de consumo de água nas estações quentes e dificuldade de aduzir água de boa qualidade das fontes para os grandes centros, pode limitar o crescimento econômico de uma região. Para exemplificar os mesmos autores citam que a agricultura na Grécia se desenvolveu significativamente a partir de 1980, entretanto, a continuidade deste desenvolvimento já está sendo ameaçada pela escassez de água.

Na Itália existe uma grande discrepância entre a situação legal e real. Devido às grandes restrições legais para o reuso agrícola, os fazendeiros fazem uso, mesmo sem autorização de água residuária na irrigação para minimizar os efeitos da escassez. Desta forma, águas residuárias são utilizadas para irrigação de grande variedade de culturas, havendo forte pressão para que novas culturas possam ser incorporadas em áreas irrigadas por efluentes (CAPRA; SCICOLONE, 2004).

Da mesma forma, a Arábia Saudita tem dificuldades para equilibrar o desenvolvimento econômico com o aumento contínuo da demanda de água e a escassez de recursos hídricos (ABU-RIZAIZA, 1999). De acordo com o mesmo autor, parte do abastecimento público municipal da Arábia Súdita é feita por água dessalinizada e parte é feita pelo aquífero Wadi, o qual é recarregado com esgoto doméstico tratado. Hespanhol (2003) afirma que em muitos do oriente médio, onde a precipitação média anual situa-se entre 100 e 200 mm, a água potável é obtida através da desalinização da água do mar e, em virtude dessa escassez, não há como sustentar a agricultura irrigada. Desta forma, mais de 50% da demanda de alimentos é satisfeita pela importação de produtos alimentícios básicos.

Na Jordânia, um sistema de lagoas de estabilização contendo 32 estações e ocupando cerca de 200 ha, produz 150.000 m³ de efluentes diariamente. Uma pequena fração deste volume, 2 a 3%, é destinada à irrigação de diversas árvores, incluindo: álamos, eucaliptos, oliveiras e macieiras. O projeto governamental que está sendo desenvolvido prevê a plantação de 3 milhões de árvores em 500 ha. Devido à intensa escassez de água neste país, a irrigação por gotejamento é a mais utilizada (AL-NAKSABANDI et al., 1997).

No Brasil, segundo Hespanhol (2001), o governo ainda não estabeleceu bases políticas, legais e institucionais para permitir a implementação de projetos representativos para reuso de efluentes tratados na agricultura, apesar do reuso planejado ser amplamente difundido e utilizado

mundialmente. Mesmo com escassez de recursos hídricos em algumas regiões brasileiras, esta prática não tem sido utilizada de maneira coordenada. Existem, ainda, poucos registros do reuso de efluentes tratados em diversas atividades, principalmente na agricultura. Entretanto, isto não quer dizer que não haja a prática indiscriminada desta atividade. Marouelli e Silva (1998) afirmam que, apesar do risco de transmissão de doenças, águas contaminadas por efluentes municipais não tratados vêm sendo utilizadas indiscriminadamente para irrigação de hortaliças nos cinturões verdes dos grandes centros urbanos.

Segundo Bastos e Mara (1993), a falta de sistemas de tratamento de esgotos na maioria dos municípios brasileiros, a falta de mananciais com água de boa qualidade, por serem, em sua maioria, corpos receptores de esgotos, favorece a prática do reuso indiscriminado de águas residuárias. Leon e Cavalini (1999) afirmam que a maior parte das áreas agrícolas irrigadas com águas superficiais, superam amplamente o nível máximo de $1.000 \text{ CF (100mL)}^{-1}$ recomendado pela Organização Mundial de Saúde – OMS (WHO, 1989), para produtos hortigranjeiros consumidos crus.

Segundo Hespanhol (2003), os aspectos sócio-culturais e religiosos influenciam a aceitação pública do uso de água residuárias provenientes de esgotos como fonte alternativa de água na agricultura. De uma forma geral, enquanto no ocidente existe forte objeção à prática, em diversos países asiáticos o reuso é realizado regularmente e considerado como economicamente e ambientalmente recomendável.

2.3 Aspectos técnicos do uso de águas residuárias em sistemas de irrigação

Hespanhol (2001) considera que a escolha do método de irrigação das culturas também é fator decisivo para se adotar riscos mínimos à saúde de trabalhadores e consumidores (Tabela 3). Também afirma que o emprego de irrigação localizada minimiza o risco de contaminação dos alimentos pela água residuária e que um sistema de drenagem adequado deve ser considerado para minimizar o risco de salinização dos solos. Na mesma linha de argumentação, Capra e Scicolone (2006) afirmam que os critérios utilizados para a decisão quanto à viabilidade do uso de águas residuárias ignoram as vantagens de sistemas de irrigação por gotejamento e o solo age como um biofiltro eficiente.

Tabela 3 - Fatores que afetam a escolha do processo de irrigação e as medidas protetivas requeridas quando se utiliza esgoto

Método de irrigação	Fatores que afetam a escolha	Medidas protetivas necessárias
Inundação	Custo baixo. Sistematização do terreno normalmente necessária.	Proteção completa para trabalhadores agrícolas, consumidores e manuseadores de culturas.
Sulcos	Custo baixo. Nivelamento do terreno pode ser necessário.	Proteção para trabalhadores agrícolas. Possivelmente necessária para consumidores e manuseadores.
Aspersão	Boa eficiência do uso da água. Não há necessidade de nivelamento do terreno	Algumas culturas da categoria B ⁽¹⁾ , principalmente árvores frutíferas são excluídas. Distância mínima de 100 metros de casas e estradas.
Sub-superficial e localizada	Custos elevados. Elevada eficiência do uso da água. Alta produtividade agrícola	Filtração e tratamentos químicos associados para evitar entupimento de orifícios

Fonte: adaptado de Hespanhol (2001).

⁽¹⁾ Irrigação de cereais, culturas industriais, forragem, pastos e árvores.

A Tabela 3 aponta que os métodos de irrigação por gotejamento e sub-superficiais são aqueles que requerem medidas protetivas mais acessíveis, uma vez que reduzem os riscos associados à saúde pública. Evita-se também o escoamento superficial da água e se o solo for coberto por capa plástica a contaminação dos produtos é praticamente evitada (CAPRA; SCICOLONE, 2004). Em dois estudos de caso relatados por Oron et al. (1999), não foi detectada a presença de contaminação por coliformes fecais em grãos de milho irrigados com água residuária e sistemas de irrigação por gotejamento superficial e subterrâneos.

Segundo Marouelli e Silva (1998), dependendo do grau de contaminação, tipo de cultura e sistema de irrigação adotado, a água contaminada por patógenos pode ser utilizada sem maiores problemas para fins de irrigação. Estes autores afirmam que hortaliças e frutas que apresentam superfície lisa e pequena em relação ao seu volume, como tomate, pimentão, berinjela e manga, possuem capacidade reduzida de retenção e sobrevivência de microorganismos nelas depositados pela água de irrigação. Trabalhando com o cultivo de pimentão e irrigando-os com efluente tratado por lagoas de polimento, Duarte; Lima e Haandel (2002) obtiveram rendimentos acima da

média, chegando a produzir 62,5 Mg ha⁻¹ de frutos, os quais ficaram dentro dos padrões de qualidade exigidos pela WHO (1989), podendo assim, serem consumidos sem malefícios à saúde dos consumidores.

A decisão sobre a construção de sistemas para uso agrícola de águas residuárias deve envolver estudos minuciosos e multidisciplinares, para direcionamento das melhores técnicas de tratamento a serem empregadas, culturas e regiões a serem irrigadas, buscando sempre um modelo de desenvolvimento sustentável da atividade, em que tanto a questão econômica, quanto questões sócio-ambientais sejam consideradas.

2.4 Aspectos econômicos do uso de águas residuárias na irrigação

Água residuária é considerada a fonte marginal de água preferida, desde que seu suprimento seja viável e uniforme. O volume anual de efluentes disponível acompanha o crescimento populacional e seu uso também se intensifica à medida que a consciência coletiva de qualidade ambiental cresce.

Os custos de tratamento, operação, manutenção e recuperação do capital investido nos sistemas de tratamento de água residuária são afetados pelo nível de tratamento requerido e pela escala do sistema. A adição de algum estágio de tratamento resulta em elevação do custo total por metro cúbico de efluente tratado, e o aumento da extensão do tratamento resulta em menor custo unitário. Em Tel Aviv uma área de tratamento de esgoto doméstico tem um custo anual de U\$ 0,60 m⁻³ de efluente tratado (HARUVY, 1997).

A avaliação econômica de um sistema de reuso de efluentes na agricultura pode ser baseada na comparação com os seguintes cenários: ausência de agricultura, agricultura sem irrigação, irrigação com água de fonte alternativa com e sem a aplicação de nutrientes (HESPANHOL, 2001).

Os custos envolvidos em projetos de reuso em irrigação devem abranger: sistemas de tratamento; custo do terreno; projetos e serviços de engenharia; materiais e equipamentos necessários tanto para os tratamentos, quanto para os sistemas de irrigação; custos de armazenamento e bombeamento de efluentes; custos de monitoramento ambiental e sanitário.

Os custos dessa fonte de água são baixos quando comparados àqueles de outras fontes não convencionais, e envolvem as necessidades de adaptação do efluente ao objetivo agrícola. Para

isso, o efluente deve passar por um determinado nível de tratamento, deve ser armazenado e transportado para as áreas de produção agrícola. Estas três etapas têm custos variáveis que devem ser somados para obtenção do custo total de reuso na agricultura. No entanto, deste valor obtido, deve-se deduzir o custo de uma disposição ambientalmente correta deste efluente, ou seja, o custo necessário para tratamento do efluente que atenda as normas ambientais, caso se optasse por sua disposição direta nos corpos d'água ao invés de se reutilizar na agricultura, e o custo referente à economia na fertilização, uma vez que a água residuária contém diversos nutrientes.

Obviamente que o uso de águas residuárias também representa risco ao meio ambiente, uma vez que contêm uma série de produtos de origem orgânica, sólidos em suspensão, microorganismos patogênicos, macronutrientes e apresentam salinidade. Este último é um parâmetro fundamental para determinação da viabilidade do reuso de efluentes tratados, já que os processos de dessalinização são muito mais onerosos quando comparados aos tratamentos usuais. Estas propriedades físicas, químicas e biológicas, podem causar danos ao meio ambiente, à saúde humana, aos solos, aquíferos e às culturas.

Quanto menor o custo de tratamento da água residuária, maior a lucratividade e atratividade desta fonte de água para a agricultura. O esgoto urbano deve ser tratado para ser utilizado na irrigação, mas seu tratamento também é obrigatório para disposição direta nos corpos d'água. Os benefícios do reuso da água na agricultura são expressos quando a produção agrícola é mantida enquanto as fontes de água e o meio ambiente são preservados (HARUVY, 1997). Desta forma, a decisão quanto ao reuso na agricultura deve considerar os aspectos positivos e os riscos, sendo que estes últimos podem ser minimizados, seja pela melhoria da qualidade do efluente, seja pela condução da água residuária para regiões mais distantes dos centros urbanos e pelo emprego de técnicas de irrigação que oferecem menor risco de contaminação dos alimentos produzidos. No entanto, ambas as medidas envolvem custos crescentes, e, portanto, deve-se buscar um ponto ótimo para cada situação, maximizando os benefícios e minimizando custos e danos ambientais.

Haruvy (1998) avaliou o reuso agrícola de efluentes nas regiões central e sul de Israel, submetidos a tratamentos secundários (lodo ativado) e terciários. Para isso, o autor relacionou os custos, benefícios e os riscos ambientais.

Tabela 4 - Custos diretos para várias alternativas (centavos de dólar americano m^{-3}), para uma escala de tratamento de $10^6 m^3 \text{ ano}^{-1}$

Alternativa	Disposição local em rio	Irrigação local	Bombeamento para o sul	Bombeamento para o sul
Nível de tratamento	Terciário	Secundário	Terciário	Secundário
Processo de tratamento				
Lodo ativado	16	16	16	16
Nitrificação-desnitrificação	9	---	9	---
Infiltração no solo	8	---	8	---
Desinfecção	2	---	---	---
Custo Total	35	16	33	16
Armazenamento	---	6	6	6
Bombeamento	5	5	18	18
Total Geral	40	27	57	40

Fonte: Haruvy (1997).

2.5 Tratamento de águas residuárias

O tratamento preliminar de águas residuárias visa à remoção dos sólidos grosseiros, por meio de sedimentadores ou filtros.

O tratamento primário objetiva a remoção dos sólidos sedimentáveis e parte do material orgânico. Nestes dois tratamentos há predominância de mecanismos físicos para retenção dos poluentes. A eliminação se realiza mediante uma sedimentação primária que promove uma redução dos sólidos suspensos da ordem de 65% e da Demanda Bioquímica de Oxigênio - DBO da ordem de 35% (PIZARRO, 1996).

No tratamento secundário predominam processos biológicos, cujo objetivo é a remoção de material orgânico biodegradável e, eventualmente, nutrientes (nitrogênio e fósforo), mediante a ação de microorganismos capazes de assimilar a matéria orgânica. Existem diversos tipos de tratamentos secundários, entre os principais, destacam-se: tratamentos convencionais (leitos bacterianos ou lodo ativado); lagoas aeróbias, anaeróbias ou facultativas; filtros de discos biológicos; entre outros (PIZARRO, 1996).

O tratamento terciário visa à remoção de poluentes específicos ou dos poluentes não removidos pelo tratamento secundário (VON SPERLING, 1996). Podem ser empregados

diversos processos nesta fase de tratamento: adsorção, troca iônica, osmose inversa, eliminação de nutrientes mediante precipitação, entre outros (PIZARRO, 1996).

A desinfecção da água consiste na eliminação seletiva de bactérias e vírus patogênicos, mediante a aplicação de produtos químicos (cloro, ozônio, bromo, iodo, permanganato de potássio), ou processos físicos com uso de radiação ultravioleta, fervura e radiação solar e gama (AGUIAR et al., 2002).

Em Israel, segundo Haruvy (1998), os níveis recomendáveis para tratamento do efluente são: tratamento terciário e posterior desinfecção (com processos de nitrificação-desnitrificação), com DBO e Sólidos Suspensos Totais - SST de 10 mg L^{-1} para disposição em rio na estação do verão ou para irrigação irrestrita; ou tratamento secundário, com DBO de 20 mg L^{-1} e SST de 30 mg L^{-1} , para irrigação de pomar e culturas de campo. Em relação à concentração de coliformes fecais, o limite imposto à irrigação irrestrita é igual a 2,2 CF (100 mL^{-1}), tanto para Israel, quanto para o estado da Califórnia (Estados Unidos), segundo (Oron et al., 1998). Este valor é muito mais rígido do que o recomendado pela OMS (WHO, 1989) de 1000 CF (100 mL^{-1}).

A Tabela 5 contém um resumo das recomendações da OMS de tratamento para a água residuária em função da destinação do alimento produzido com seu uso.

Tabela 5 - Recomendação da OMS para tratamento de águas residuárias destinadas à irrigação

Classificação dos alimentos	Requisito	Tratamento necessário
Não destinados ao consumo humano	Ausência de sólidos grosseiros; eliminação de ovos de parasitas; ausência de substâncias químicas que possam contaminar plantas ou peixes;	Tratamento primário
Consumidos após cozimento	Igual ao anterior mais uma redução substancial de bactérias;	Tratamentos primários, secundários e certo nível de desinfecção
Consumidos crus	Igual ao anterior mais desinfecção que assegure a desinfecção da água	Tratamentos primários, secundários e desinfecção completa

Fonte: Adaptado de Pizarro (1996).

2.6 Irrigação por gotejamento

A irrigação localizada desenvolveu-se principalmente nas décadas de 60 e 70 do século XX, embora alguns sistemas de irrigação que operavam segundo este conceito, ou seja, de aplicar

pequenas vazões de água localizadamente, diretamente sobre o sistema radicular das plantas, vinham sendo desenvolvidos desde o início deste mesmo século.

Após a Segunda Guerra Mundial, o advento de materiais plásticos permitiu o desenvolvimento de equipamentos e componentes do sistema economicamente viáveis.

Segundo Howell (2000), o Engenheiro Israelense Syncha Blass desenvolveu na Inglaterra a tecnologia para irrigar plantas em estufas de maneira localizada. Nos anos 50, este Engenheiro retornou a Israel onde aplicou com sucesso a tecnologia desenvolvida na produção de alimentos, no deserto de Negev, utilizando águas altamente salinas.

A partir da década de 60, houve grande impulso no desenvolvimento da irrigação por gotejamento. Desde então, rapidamente, o gotejamento espalhou-se por diversos países (BUCKS; NAKAYAMA, 1986).

Nos EUA a irrigação por gotejamento foi inicialmente explorada em plantações de abacate no sul da Califórnia no início da década de 60 (HOWELL, 2000).

As pesquisas científicas envolvendo irrigação por gotejamento também se desenvolveram a partir da mesma década. Em 1963 surgiram as primeiras publicações sobre este tema e em 1971, em Tel Aviv, Israel, ocorreu o primeiro encontro mundial sobre irrigação por gotejamento (BUCKS; NAKAYAMA, 1986).

Entre os sistemas de irrigação localizada, destacam-se o gotejamento e a microaspersão. O gotejamento surgiu no Brasil na década de 70 do século XX, enquanto que a microaspersão na década seguinte.

A irrigação localizada objetiva a otimização da produção agrícola através do fornecimento mínimo de água e nutrientes diretamente sobre o sistema radicular das plantas, de forma a atender as suas necessidades hídricas. O sistema de irrigação localizada mais difundido nas propriedades agrícolas e também mais pesquisado é a irrigação por gotejamento.

Dentre os métodos de irrigação, a irrigação localizada é o método que mais se desenvolveu nas últimas décadas devido à maneira racional e econômica do uso da água. Segundo Pizarro (1996), estudo divulgado pela *International Commission on Irrigation and Drainage-ICID* em 1991 apontou um crescimento da área mundial irrigada por métodos de irrigação localizada de 63% em relação aos 5 anos anteriores e de 329% em relação aos 10 anos que o precederam. Este crescimento foi ainda mais pronunciado nas áreas com maiores problemas de escassez deste recurso (TELTSCHEK et al., 1991).

Este método de irrigação é utilizado para uma grande variedade de culturas, em especial as de maior rentabilidade econômica, já que seu custo fixo inicial é elevado (SAHIN et al., 2004). Segundo Christofidis (2002), a incorporação de áreas irrigadas pelo método de irrigação localizada elevou de 112.730 ha em 1996 a 248.414 ha em 2001, resultando num crescimento relativo de 4,24% para 7,88% de toda a superfície irrigada no país para o período mencionado. A região Nordeste expandiu sua área coberta com sistemas de irrigação localizados de 55.000 a 138.400 ha no mesmo período. O estado da Bahia, entre o período compreendido entre os anos de 1996 e 2001, tornou-se o estado com maior área irrigada pelo método localizado, respondendo por 138.421 ha, seguido por Minas Gerais com 44.590 ha e São Paulo com 32.010 ha.

Além disso, a irrigação por gotejamento apresenta uma série de vantagens potenciais sobre outros métodos de irrigação. Desta forma, a opção por esta técnica torna-se também, uma medida fundamental para a preservação dos recursos hídricos de uma dada região. Para Oro et al (1979 apud DASBERG; BRESLER, 1985) e Bielorai et al (1980 apud DASBERG; BRESLER, 1985), a irrigação por gotejamento pode utilizar águas residuárias depois de tratamento secundário e adequada filtração.

O interesse por este método deve-se, principalmente, pela economia de água acompanhada por um aumento substancial na produção das culturas, especialmente aquelas que respondem a maiores níveis de umidade no solo (BERNARDO, 1986).

Mas, se por um lado este método reduz a quantidade de água necessária à produção dos alimentos, necessita também de águas de melhor qualidade. Estes sistemas, por terem emissores de água de diâmetro reduzido e sujeito ao entupimento por partículas sólidas em suspensão na água, podem ter a eficiência de distribuição de água às plantas reduzida no decorrer de sua utilização. Inúmeras pesquisas apontam a ocorrência de entupimento dos emissores mesmo quando são empregados tratamentos químicos preventivos. Com a utilização de águas residuárias para a irrigação, o processo de entupimento dos gotejadores pode ocorrer ainda mais prematuramente (RAVINA et al., 1997).

Um sistema de irrigação por gotejamento é composto, basicamente, de duas partes: o cabeçal de controle, e as tubulações.

O cabeçal de controle compreende o conjunto moto-bomba; sistema de filtros para tratamento físico da água; sistema de injeção de fertilizantes (fertirrigação) e outros produtos

químicos (algicidas, fungicidas, nematicidas, herbicidas); sistema regulador de pressão e vazão; sistema de controle automático das operações; válvula de retenção; manômetros e hidrômetros.

As canalizações podem ser de PVC ou polietileno flexível, formando um reticulado de linhas laterais capazes de abranger toda a área a ser irrigada. É interessante que nem todas as linhas laterais funcionem simultaneamente para minimizar a capacidade do cabeçal de controle, promovendo desta forma uma economia substancial no custo inicial do sistema de bombeamento, sistema de filtração e outros componentes.

A tubulação lateral deve ter cor preta para evitar o crescimento e proliferação de algas internamente aos tubos, após o ponto de filtração da água, podendo provocar problemas de obstrução dos gotejadores.

Nos terrenos inclinados, as linhas de derivação são montadas acompanhando a direção de declividade do terreno, enquanto que as linhas laterais são dispostas em nível, a fim de manter uma pressão de serviço interna constante.

As tubulações do sistema podem ser superficiais ou enterradas, para não atrapalhar a circulação de maquinário e a realização dos tratamentos culturais necessários.

Os gotejadores são as estruturas responsáveis pela emissão da água. Têm a função de dissipar a pressão da água e permitir a passagem de pequenas vazões, de maneira constante e uniforme. Devem também, e preferencialmente, possuir um orifício de descarga de água relativamente grande, serem baratos, resistentes e compactos (BERNARDO, 1986).

A vazão nos gotejadores pode variar entre 1 a 10 L h⁻¹ sob uma pressão de serviço da ordem de 100 kPa (variando de 20 a 300 kPa). Em termos práticos, a vazão em qualquer parte do sistema pode variar até 10% de seu valor médio, para que haja uma boa uniformidade na aplicação da água. É interessante que o gotejador apresente vazão constante para uma ampla faixa de pressão.

Devido ao pequeno diâmetro dos orifícios de passagem de água nos gotejadores, variando entre 0,3 e 1,5 mm, sua confecção deve ser bastante uniforme, exigindo dos fabricantes um rigoroso controle de qualidade, a fim de evitar o seu fácil entupimento ou o aumento indesejável da vazão.

Os gotejadores com seção de escoamento inferior a 0,7 mm de diâmetro são classificados como muito sensíveis ao entupimento devido às partículas em suspensão presentes na água de

irrigação. Os gotejadores com orifícios de diâmetro variando entre 0,7 e 1,5 mm são tidos como sensíveis ao entupimento.

Entre as diversas classificações dos tipos de gotejadores existentes, a classificação proposta por Pizarro (1996) contempla emissores de baixa vazão (menor que 16 L h^{-1}).

Tabela 6 - Classificação dos gotejadores de baixa vazão segundo diâmetro de emissão

Gotejadores	
De diâmetro largo	De diâmetro reduzido
De orifício	Microtubo
Vortex	Helicoidal / Espiral
Autocompensante	Labirinto

Fonte: Adaptado de Pizarro (1996).

A seguir são descritas as características principais dos microtubos e gotejadores tipo labirinto, os quais foram objeto de estudo do presente trabalho.

1. Microtubo: é o mais antigo gotejador de longo percurso existente. Proporciona a perda de carga através de um estreito e longo percurso da água no interior do gotejador. Baixas vazões podem ser obtidas com tubos de maior diâmetro, tornando-os, portanto, menos susceptíveis ao entupimento. O diâmetro dos microtubos varia entre 0,6 e 2,0 mm. No entanto estes gotejadores apresentam inconvenientes típicos do regime laminar: alta sensibilidade à temperatura da água e pressão de serviço. Por outro lado, Tibau (1977) afirma que com o uso dos microtubos, quando ocorre aclividade ou declividade do terreno, é possível promover compensação de perda de carga fazendo variar seu comprimento para mais ou para menos, já que sua vazão é proporcional a esta dimensão. Por este motivo Pizarro (1996) comenta que na Espanha os microtubos tornaram-se muito popular. Souza e Botrel (2003) consideram que estes gotejadores são fáceis de serem instalados e possuem um baixo custo quando comparado aos outros tipos de gotejadores.
2. Gotejador do tipo Labirinto: este gotejador é o último tipo na evolução histórica dos gotejadores de comprimento longo. Obriga a água a percorrer uma trajetória tortuosa, o que torna estes gotejadores mais susceptíveis ao entupimento, uma vez que a mudança brusca na direção do escoamento torna estes locais mais propensos à formação de depósitos (PIZARRO, 1996). São pouco sensíveis à temperatura, compactos e de custo mais elevado quando comparado aos microtubos.

Segundo Ravina et al. (1997), diferenças quanto à sensibilidade ao entupimento dos distintos tipos de gotejadores devem ser consideradas na escolha do modelo mais apropriado, principalmente quando se utiliza água residuária na irrigação.

Cada gotejador tem sua vazão de projeto à pressão normal de operação e possui um determinado coeficiente de variação de fabricação. Este coeficiente possui um importante efeito na eficiência de irrigação do sistema (DASBERG; BRESLER, 1985).

As características hidráulicas dos gotejadores são resultantes das características de acabamento das partes internas, do projeto do gotejador, do material utilizado na fabricação e do método de instalação.

Uma fórmula empírica válida para uma estreita faixa de pressão de serviço, que caracteriza a relação vazão-pressão num emissor é:

$$Q = K.H^x \quad (1)$$

em que:

Q – vazão do emissor, L h⁻¹;

K – constante característica do emissor, adimensional;

H – pressão da água, mca;

x – constante que caracteriza o regime de escoamento no emissor, adimensional.

A eq. (1) indica que, quanto maior for o expoente da curva vazão *versus* pressão do gotejador “x”, maior será a variação da vazão em função de alterações na pressão da água. A Tabela 7 apresenta os valores usuais destes coeficientes para os microtubos e gotejadores tipo labirinto.

Tabela 7 - Expoente da curva vazão *versus* pressão “x” para diferentes tipos de emissores

Emissor	X
Microtubo	0,75 – 1,00
De regime turbulento (orifício, labirinto)	0,50

Fonte: Pizarro (1996).

Segundo os dados apresentados na Tabela 7 verifica-se que os microtubos são mais dependentes em relação a variações de pressão do que os gotejadores tipo labirinto. Desta forma,

os sistemas de irrigação por gotejamento que utilizam microtubos devem ser cuidadosamente dimensionados. Segundo Silva et al (1987 apud SOUZA; BOTREL, 2003), sistemas de irrigação por gotejamento com microtubos podem obter razoáveis níveis de uniformidade de distribuição de água quando bem dimensionados, considerando o processo artesanal e o baixo custo de confecção e instalação dos mesmos.

O coeficiente de variação de fabricação é um índice que informa a variação da vazão para uma determinada amostra de gotejadores novos. É decorrente do projeto do gotejador, material utilizado em sua fabricação e a precisão com que o gotejador é fabricado. Segundo Keller e Bliesmer (1990), seu valor é calculado por:

$$CV_f = \frac{s}{\bar{q}} \cdot 100 \quad (2)$$

em que:

CV_f - coeficiente de variação de fabricação, %;

s – desvio padrão da média de vazão dos gotejadores, $L h^{-1}$;

\bar{q} - vazão média dos gotejadores à determinada pressão e temperatura padrão, $L h^{-1}$.

Existem diversas propostas de classificação do coeficiente de fabricação dos emissores. A classificação recomendada pela *American Society of Agricultural Engineers* - ASAE (1998) está disposta na Tabela 8.

Tabela 8 - Classificação do coeficiente de variação de fabricação de emissores

CV_f (%)	Uniformidade de fabricação
< 5	Excelente
5 - 7	Média
7 a 11	Marginal
11 a 15	Pobre
> 15	Inaceitável

Fonte: ASAE (1998).

Resende (1999) afirma que o atual desenvolvimento dos processos de fabricação diminuiu consideravelmente a influência deste fator sobre a uniformidade de distribuição de água, sendo

então mais recomendada a utilização de coeficientes de uniformidade que levam em consideração a performance dos gotejadores no campo.

2.6.1 Qualidade e tratamento da água para irrigação por gotejamento

O grande problema da irrigação por gotejamento está ligado ao processo de entupimento de emissores e tubulações. Além do silte e argila, as causas mais comuns de entupimento são: precipitados químicos (como o carbonato de cálcio, compostos de fosfato de cálcio, óxido de ferro, entre outros), algas e bactérias (AL-NAKSHABANDI et al., 1997). Para Roman (1999), entre os principais agentes potenciais de entupimento dos gotejadores citam-se: precipitados químicos, insetos, partículas minerais e microorganismos em geral. No entanto, este mesmo autor afirma que na maioria das vezes o entupimento dos emissores é resultante da combinação de dois ou mais fatores, especialmente entre os materiais de origem orgânica e inorgânica.

Um aspecto de importância vital para os sistemas de irrigação por gotejamento diz respeito ao tratamento da água de irrigação. Segundo Dasberg e Bresler (1985) a melhor maneira de reduzir ou prevenir os problemas associados com o entupimento dos gotejadores, e também a mais econômica, é através de filtração adequada da água. Pizarro (1996) chama a atenção para a necessidade de se adotar uma filtração mais intensa quando são utilizadas águas residuárias para a irrigação, uma vez que o risco de entupimento dos emissores é mais elevado.

Segundo Rangel (2001), há uma mudança temporal na qualidade da água ao longo do ano provocada pelas mudanças de estação. Desta forma, o sistema de tratamento deve ser dimensionado para operar satisfatoriamente durante a estação do ano em que a qualidade da água é a pior possível. Partículas físicas, químicas e biológicas que podem promover a obstrução dos gotejadores são apresentadas na Tabela 9.

A Tabela 10 apresenta as concentrações de diversos parâmetros físicos, químicos e biológicos que proporcionam riscos potenciais de entupimento dos gotejadores.

Tabela 9 - Elementos físicos, químicos e biológicos que produzem obstruções nos sistemas de irrigação localizada

Físicos (sólidos em suspensão)	Químicos (precipitação)	Biológicos (bactérias e algas)
1 - Partículas inorgânicas (a) Areia (b) Silte (c) Argila (d) Plástico	1 - Carbonatos de Ca e Mg	1 – Filamentos
2- Partículas orgânicas (a) Plantas aquáticas (fitoplancton/algas) (b) Animais aquáticos (zooplancton) (c) Bactérias	2 - Sulfato de Ca 3 - Metais pesados nas formas de: (a) hidróxidos (b) carbonatos (c) silicatos (d) sulfetos. 4 – Óleos ou outros lubrificantes 5 – Fertilizantes: (a) Fosfato (b) Amônia líquida (c) Fe, Cu, Zn e Mn	2 - Lodo 3 - Depósitos microbianos (a) Ferro (b) Enxofre (c) Manganês

Fonte: Adaptada de Bucks e Nakayama (1986).

Tabela 10 - Risco potencial de obstruções segundo qualidade da água de irrigação

Tipo de problema	Risco		
	Baixo	Médio	Alto
Físico			
Sólidos em suspensão (ppm)	< 50	50 a 100	>100
Químico			
pH	< 7,0	7,0 a 8,0	> 8,0
Sólidos dissolvidos (ppm)	< 500	500 a 2.000	> 2.000
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)	< 0,7	0,7 a 3,0	> 3,0
Mn (ppm)	< 0,1	0,1 a 1,5	> 1,5
Ferro Total (ppm)	< 0,2	0,2 a 1,5	> 1,5
SH ₂ (ppm)	< 0,2	0,2 a 2,0	> 2,0
Biológico			
Bactérias (nº mL ⁻¹)	< 10.000	10.000 a 50.000	> 50.000
DBO (mg L ⁻¹)	< 15	15 a 40	> 40

Fontes: Bucks e Nakayama (1986), Ayers e Westcot (1999) e Capra e Scicolone (2004).

Al Nakshabandi et al. (1996) afirmam que concentrações de sólidos suspensos em águas residuárias podem atingir valores entre 100 e 200 mg L⁻¹, principalmente devido à presença de algas. Outro problema citado é risco de acúmulo de sais no solo, na periferia do bulbo molhado.

Tratamentos físicos e químicos da água, convencionais e alternativos, são amplamente pesquisados para enfrentar o principal problema da irrigação por gotejamento: o entupimento de emissores. Recentemente, Sahin et al. (2004), demonstraram que métodos biológicos de tratamento para recuperação de gotejadores entupidos apresentam grande potencial.

2.6.2 Filtração da água

Para Capra e Scicolone (2004) a filtração da água é a principal ação preventiva quanto ao entupimento de emissores, causada por partículas tanto de origem mineral quanto orgânica. Se a água de irrigação for residuária e apresentar elevada concentração de sólidos suspensos, recomenda-se o emprego de sedimentadores, eficientes na remoção de areia e silte.

Segundo Ravina et al (1997), a filtração da água de irrigação é usualmente feita com a associação de filtros de areia com filtros de tela ou disco. Para Dasberg e Bresler (1985), o emprego de filtro de areia é fundamental quando se utiliza água residuária para irrigação.

Capra e Scicolone (2004) afirmam que os principais filtros utilizados em irrigação são os de tela, pois são simples, econômicos e de fácil manejo. Já os filtros de areia, embora sejam particularmente viáveis para águas com elevada concentração de sólidos suspensos, são mais complexos e caros.

Nos reservatórios de água residuária desenvolve-se uma grande variedade de fitoplactons e zooplactons, algas e bactérias, que podem se aglomerar com partículas sólidas em suspensão na água e ainda com mucilagens resultantes das atividades microbiológicas de outros organismos. Desta forma, recomenda-se à utilização de filtração da água, tratamento químico e limpeza das linhas laterais de gotejamento (CAPRA; SCICOLONE, 2004). Estes mesmo autores afirmam que devem ser adotadas medidas especiais de manejo e os componentes dos sistemas de irrigação por gotejamento devem ser cuidadosamente selecionados quando se utiliza água residuária na irrigação.

Segundo Brandão; Mota e Maia. (2002), de acordo com a taxa de filtração utilizada os filtros podem ser classificados como rápidos (120 a 240 m³ m⁻² d⁻¹) ou lentos (3 a 6 m³ m⁻² d⁻¹).

A filtração lenta pode ter grande aplicabilidade nos sistemas de reuso, já que seu efluente pode ser utilizado em atividades que necessitam de água não potável, como por exemplo, a irrigação.

Segundo Londe e Paterniani (2003), a filtração lenta é uma alternativa simples e eficaz para complementar o tratamento de águas residuárias, visando a reutilização em atividades agrícolas. O uso deste filtro proporciona uma eficiente remoção de partículas sólidas em suspensão, minimizando o risco de obstrução de emissores quando a água for utilizada para irrigação localizada. Além disso, o efluente do filtro lento apresenta valores adequados de pH, clorofila a, cor, turbidez, ferro e manganês. Entretanto, apesar do filtro lento ser eficiente na remoção de coliformes totais e *E.coli*, é recomendável que o seu efluente passe por um processo de desinfecção, para o mesmo atinja os padrões impostos pela legislação para uso agrícola.

Di Bernardo (1993) afirma que durante a sua passagem pelo filtro lento a água muda continuamente de direção, favorecendo o contato entre as impurezas e os grãos do meio filtrante, com retenção de parte delas, principalmente até 40 cm de profundidade. A filtração lenta é resultante de várias ações distintas: transporte, aderência e atividade biológica. Acredita-se que no início de funcionamento de um filtro lento, alguns mecanismos sejam mais eficientes e a partir de certo período, outros passem a dominar, especialmente após a formação de uma camada biológica no topo da camada filtrante denominada superfície de coesão ou *schmutzdecke*. Esta é formada por uma comunidade heterogênea de bactérias, algas, protozoários e invertebrados, além de precipitados de ferro e manganês, quando estes metais estão presentes no afluente (TANGERINO; DI BERNARDO, 2005). A atividade biológica é considerada a mais importante na filtração lenta, ocorrendo em seja eficiente é necessário que a turbidez, cor verdadeira, sólidos suspensos e coliformes sejam limitados a valores relativamente baixos.

A filtração lenta é um sistema de tratamento viável para condições brasileiras por apresentar simplicidade de operação e exigir pouco investimento em sua implantação (PATERNIANI; CONCEIÇÃO, 2004; TANGERINO; DI BERNARDO, 2005). Além disso, não necessita de produtos químicos e produz pouco lodo.

2.6.3 Tratamento químico da água

O tratamento químico da água pode ser feito de maneira preventiva ou curativa. Grande parte das pesquisas envolvendo irrigação localizada enfoca tratamentos preventivos. A injeção de produtos químicos nas linhas de irrigação pode ser necessária para dissolver precipitados minerais ou prevenir o desenvolvimento de limo (CAPRA; SCICOLONE, 2004).

Ravina et al (1997) afirmam que a cloração para o controle da atividade microbiológica é aparentemente necessária quando a fonte de abastecimento do sistema é água residuária.

Hills e Brenes (2001) obtiveram excelentes resultados na prevenção do entupimento de 4 tipos de fitas gotejadoras de diferentes marcas utilizando água residuária. Para tanto, combinaram filtração (um filtro de areia e um de tela com poros de diâmetro de $100 \mu\text{m}$) com cloração intermitente (cloro livre residual na concentração de $0,4 \text{ mg L}^{-1}$).

Bomam e Ontermma (1994 apud RESENDE, 1999), detectaram um custo médio de prevenção de entupimento de 60 dólares americanos por hectare com cultivo de citros no Estado da Califórnia.

O biocida mais econômico e utilizado em irrigação localizada é o cloro, na forma de hipoclorito de sódio (NaOCl) ou de cloro gasoso. Este último, segundo Pizarro (1996), é mais perigoso e deve ser manejado por pessoas especializadas. Parte do cloro injetado na água é absorvida pela matéria orgânica sem destruí-la (cloro combinado). O cloro também pode reagir com os íons amônio, formando cloramidas, ou com compostos inorgânicos como o sulfeto de hidrogênio (H_2S) e ferro. O cloro livre é a porção que não foi consumida nestas reações e que efetivamente atua como biocida. A morte dos microorganismos requer um tempo de contato mínimo de 30 minutos com o cloro livre. Mantido o pH entre 5,0 e 6,0, o poder biocida do cloro é elevado enormemente pelo aumento da proporção de ácido hipocloroso (HOCl) na solução (BUCKS; NAKAYAMA, 1986).

Muitos estudos têm sido desenvolvidos com a utilização da cloração como tratamento químico da água, entretanto, o uso desta técnica promove danos ambientais e à saúde humana devido aos subprodutos (tais como os trihalometanos) gerados pelo seu uso intensivo. Além disso, embora possa ser eficiente na prevenção de entupimento dos emissores, não existe consenso entre os pesquisadores quanto à dose, frequência e melhor forma de aplicação.

Segundo Roman (1999), a presença do elemento nitrogênio presente na água de irrigação diminui a ação biocida do cloro.

Desta forma, tratamentos alternativos da água residuária vêm sendo amplamente estudados para elevar a eficiência dos tratamentos de efluentes como meio de reduzir o potencial de obstrução de emissores e atuar na inativação de microorganismos patogênicos. Para Aguiar et al. (2002) o emprego de desinfetantes alternativos foi incrementado por dois fatores: a progressiva evolução dos padrões de potabilidade da água culminando com a inserção dos trihalometanos como padrão de qualidade da água e constatação da maior resistência de microorganismos à ação do cloro (cistos e oocistos de protozoários).

Uma técnica com potencial a ser utilizado como tratamento para a desobstrução de gotejadores é a injeção de dióxido de carbono na água de irrigação, uma vez que este gás é de baixo custo, além de ser facilmente manipulado e aplicado. Somando-se a isso o gás carbônico é uma substância bastante volátil e conseqüentemente de baixo risco ambiental. Sabe-se também, que a injeção de dióxido de carbono no meio líquido propicia a diminuição do pH, podendo desta forma, auxiliar na inativação de microorganismos patogênicos do meio. Andria (1990 apud GOMES, 2001) observou redução do de 6,4 para 4,5 do pH da água de irrigação em tratamentos que receberam injeção de CO₂.

Além de atuar como inibidor ao processo de entupimento devido aos fatores de origem biológica dos emissores empregados na irrigação por gotejamento, diversos estudos indicam benefícios de ordem produtiva com a aplicação de dióxido de carbono, seja pelo enriquecimento da atmosfera em cultivo em casas de vegetação ou na própria água de irrigação. Processos fisiológicos ou bioquímicos das plantas são beneficiados pela aplicação de dióxido de carbono, causando respostas positivas em relação à produtividade em várias espécies (GOMES, 2001).

Pinto et al. (1999) afirmam que a aplicação de CO₂ melhora o metabolismo e o equilíbrio hormonal das plantas, resultando na elevação da atividade fotossintética e da absorção de nutrientes, proporcionando maior resistência a doenças e maior produtividade.

2.6.4 Radiação Ultravioleta

Segundo Aguiar et al. (2002), embora o efeito germicida da radiação ultravioleta tenha sido detectado em 1878, as primeiras unidades foram construídas somente em 1955, na Áustria e Suíça. Desde o início do século XX a radiação ultravioleta - UV é reconhecida como um eficiente agente desinfetante (WOJTENKO; STINSON; FILED, 2001). Diversas são as aplicações desta tecnologia como desinfetante, incluindo esterilização de ambientes (ar e superfícies), água e líquidos em geral. Recentemente, este método de desinfecção vem sendo bastante empregado como tratamento terciário dos efluentes provenientes de estações de tratamento de esgotos. Pires (2002) afirma que a preocupação na disposição final de resíduos líquidos, manutenção de qualidade dos corpos receptores e reutilização das águas é crescente e devido à simplicidade operacional dos sistemas de desinfecção por radiação ultravioleta, tem-se uma importante tecnologia aliada para as mais diversas aplicações.

Os raios ultravioletas possuem comprimento de onda entre 40 e 400 nm, e situam-se entre os raios x e a luz visível no espectro eletromagnético. Segundo Sobotka (1993, apud PIRES, 2002), a divisão mais aceita para a radiação ultravioleta é: vácuo (40 a 200 nm), uv – C (200 a 280 nm), uv – B (280 a 315 nm) e uv – A (315 a 400 nm).

Wojtenko; Stinson e Filed (2001) afirmam que o intervalo de comprimento de onda de 200 a 320 nm é utilizado na desinfecção de água residuária, sendo que a máxima eficiência é obtida para os comprimentos de onda entre 250 e 265 nm para a maioria dos microorganismos.

A radiação ultravioleta é gerada por meio de lâmpadas especiais preenchidas com vapor de mercúrio e um gás, inerte, geralmente o argônio. Estas são tubulares (como as lâmpadas fluorescentes) e de baixa potência (entre 15 e 60 W). As lâmpadas de baixa pressão (100 Pa ou 0,001 atm) são praticamente monocromáticas, mais de 85% da luz emitida tem um comprimento de onda de 253,7 nm, o mais letal aos microorganismos (PIRES, 2002; DI BERNARDO, 1993). Já as lâmpadas de média e alta pressão emitem um espectro de luz muito mais amplo, incluindo a faixa completa de radiação ultravioleta e do visível, o que dificulta a determinação da dose aplicada. O tempo de vida útil das lâmpadas de baixa pressão varia entre 5 e 10 mil horas, considerando que as mesmas fiquem ligadas por, pelos menos, 8 horas continuamente (WOLFE, 1990 apud PIRES, 2002).

São inseridas em reatores fotoquímicos, construídos de material refletor para aumentar a eficiência do processo e que utilizam energia elétrica. Segundo Di Bernardo (1993) o alumínio é

um material que apresenta inúmeras características que o torna recomendável para a construção de refletores. Para o comprimento de onda de 253,7 nm, a porcentagem de reflexão é de 60 a 90% quando a superfície é polida.

Os sistemas uv são relativamente baratos para instalar, seguros e fáceis de operar. Oferecem custos operacionais comparáveis aos sistemas de cloração (VOUTCHKOV,1995; PIRES, 2002).

Enquanto a cloração exige altas dosagens e longo tempo de contato, a radiação ultravioleta tem alto grau de inativação de microorganismos patogênicos em tempo de contato reduzido, no entanto o impacto desta radiação varia para cada espécie, bem como a fase do microorganismo. Segundo Wojtenko; Stinson e Filed (2001) as paredes celulares de bactérias não oferecem resistência à penetração da radiação uv, mas doses mais elevadas são necessárias para a inativação de esporos e cistos. Alguns vírus também possuem estrutura celular que promovem maior resistência à ação da radiação ultravioleta. O Rotavírus é 10 a 11 vezes mais resistente quando comparado a *Escherichia coli*.

A ação da radiação ultravioleta é física, atingindo principalmente os ácidos nucléicos dos microorganismos, promovendo reações fotoquímicas capazes de inativa-los (PIRES, 2002).

A dosagem aplicada pela radiação ultravioleta resulta do produto da intensidade da radiação bactericida ($W\text{ cm}^{-2}$) pelo tempo de exposição (s). É desejável que o escoamento no interior dos reatores seja turbulento para que as partículas suspensas passem por todos os níveis de intensidade de radiação uv que é desuniforme. A determinação da dosagem de radiação uv aplicada só pode ser estabelecida por meio de radiômetros ou actinômetros. Mas, segundo Aguiar et al. (2002), o campo de radiação dentro do reator pode ser bastante variável, o que torna difícil a determinação da intensidade média relativo ao volume de líquido no interior do equipamento. Desta forma, o método mais apropriado seria a utilização de substâncias actinométricas, que sofrem reações fotoquímicas em comprimentos de onda específicos. Quando exposto à radiação ultravioleta, o ferrioxalato de potássio é reduzido.

Aguiar et al. (2002) afirma que não se tem estabelecido valores de doses mínimas a serem adotadas na desinfecção com radiação UV em virtude de diversos fatores que influenciam o processo: características físico-químicas da água, nível de contaminação microbiológica, impacto sobre os microorganismos das etapas de tratamento anteriores à desinfecção e grau de risco a ser

assumido. Estes autores citam diversas doses recomendadas por agências americanas e adotadas em alguns países europeus, todas no intervalo de 16 a 38 mJ cm⁻².

Para Pires (2002) a radiação ultravioleta pode ser utilizada no processo de efluentes de estações de tratamento de esgotos, desde que observados alguns parâmetros: tempo de detenção hidráulico, intensidade da lâmpada, qualidade do efluente líquido. O autor concluiu que, em alguns casos, a qualidade do efluente representa maior impedimento ao sucesso da desinfecção que a própria dose de radiação aplicada. Já Sant'Ana et al. (2003) afirmam que os sistemas de desinfecção por radiação ultravioleta dependem de três fatores: propriedades hidráulicas (relação comprimento/largura do canal do reator, velocidade de escoamento e dispositivos de entrada e saída), características do efluente (valores baixos de sólidos suspensos e turbidez garantem maior desinfecção) e intensidade de radiação (idade da lâmpada, sujeira, localização da lâmpada no reator).

Segundo Wojtenko; Stinson e Filed (2001), o processo de desinfecção é altamente dependente da quantidade e qualidade da água residuária, incluindo concentrações microbiológicas, concentração de sólidos suspensos, turbidez, partículas de alta granulometria e altas variações de temperatura. Di Bernardo (1993) afirma que a concentração de partículas suspensas na água, bem como o seu tamanho e distribuição de tamanhos afetam significativamente a ação germicida da radiação ultravioleta. Sendo assim, um pré-tratamento anterior à desinfecção é o principal pré-requisito para garantir a eficácia do tratamento por ultravioleta em águas residuárias. Pires (2002) afirma que partículas de tamanho inferior a 7µm têm pouca influência no tratamento.

2.6.5 Uniformidade de aplicação da água

A uniformidade de distribuição de água às plantas está diretamente ligada ao problema de entupimento dos gotejadores. Segundo Capra e Scicolone (2004), a detecção de emissores entupidos e posterior limpeza ou reposição são processos difíceis e que exigem elevado investimento. A uniformidade é afetada pelo dimensionamento hidráulico, topografia, pressão de operação, comprimento da tubulação lateral, espaçamento entre emissores e variabilidade de descarga dos emissores. Este último parâmetro é função da variação da temperatura da água, coeficiente de variação de fabricação, desgaste e entupimento dos emissores (ASAE, 1998).

O regime de escoamento nas linhas laterais de gotejamento exerce influência sobre o entupimento dos gotejadores. Segundo Hills e Brenes (2001), recomenda-se manter regime turbulento no interior das linhas laterais de gotejamento para evitar sedimentação das partículas suspensas e posterior obstrução dos orifícios.

A uniformidade de distribuição de água às plantas é fundamental para a obtenção da máxima produtividade da lavoura e/ou rentabilidade. Baixa uniformidade significa que há excesso de água em certos pontos do campo e falta em outros. Para atender as necessidades hídricas das plantas localizadas em posição crítica, aumenta-se o consumo de água utilizada na irrigação da área, podendo haver percolação profunda da água, aumento no consumo de energia, lixiviação de nutrientes, necessidade de drenagem e contaminação subterrânea (Capra e Scicolone, 2004). Desta forma, pode-se afirmar que, quanto maior o valor do coeficiente de distribuição de água de um sistema, menor serão as lâminas aplicadas para se atingir uma máxima produção.

O desempenho dos sistemas de irrigação localizada pode ser avaliado através de medidas da pressão de serviço, taxas de aplicação (vazão) e uniformidade de aplicação de água.

Segundo trabalho de pesquisa realizado por Bralts e Kesner (1983), para determinar a uniformidade de distribuição de água no campo deve-se determinar a vazão dos gotejadores através do método volumétrico. Ou seja, mede-se o tempo necessário para encher um recipiente de água com volume conhecido. Segundo os autores, o teste de uniformidade deve ser feito a cada 6 meses nos sistemas de irrigação localizada.

Baixos valores de uniformidade podem ser decorrentes de fatores como: diâmetro das tubulações impróprias, pressão de serviço muito alta ou baixa, emissores não apropriados para o sistema projetado, emissores entupidos, mudanças nos componentes do sistema ou desgaste dos mesmos e mudanças na pressão de saída da bomba.

Para determinação da uniformidade de distribuição de água em sistemas de irrigação por gotejamento, deve-se medir a vazão de um determinado número de emissores e diversas linhas laterais e eventualmente a pressão de serviço no início das linhas em função da metodologia a ser adotada.

Para Merriam e Keller (1978) a uniformidade de distribuição da água é um fator importante a ser determinado, a fim de relacionar a eficiência de aplicação com o melhor espaçamento entre linhas.

Vermeiren e Jobling (1980) afirmam que a uniformidade do emissor é usada no procedimento de projeto, utilizando a eficiência para calcular a lâmina total de irrigação, o intervalo de irrigação e a seleção do tipo de emissor.

Para a avaliação da uniformidade de aplicação da água em uma unidade ou todo sistema de irrigação, a ASAE (1998) propõe o uso dos seguintes coeficientes: uniformidade estatística (U_s) e uniformidade de emissão (EU).

$$U_s = 100.(1 - cv) \quad (3)$$

em que:

U_s - uniformidade estatística, %;

cv - coeficiente estatístico de variação de vazão dos emissores, decimal.

O coeficiente estatístico de variação de vazão dos emissores é obtido por:

$$cv = \frac{s}{\bar{q}} . 100 \quad (4)$$

em que:

s – desvio padrão da média das vazões dos gotejadores, $L h^{-1}$;

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

Na eq. (4) o valor de "cv" inclui a variação da vazão dos emissores devido a todas possíveis causas, incluindo os efeitos da tubulação, das características hidráulicas dos emissores e da obstrução parcial ou total dos mesmos.

O outro coeficiente, uniformidade de emissão (EU) é calculado pela seguinte equação:

$$EU = \frac{q_{25}}{\bar{q}} . 100 \quad (5)$$

em que:

EU - uniformidade de emissão, %;

q_{25} - vazão média dos 25% menores valores, L h⁻¹.

A Tabela 11 apresenta a classificação dos sistemas de irrigação localizada de acordo com o valor de uniformidade estatística (Us) e uniformidade de emissão (EU) propostas pela ASAE (1998).

Tabela 11 - Classificação dos sistemas de irrigação por gotejamento segundo a uniformidade estatística (Us) e uniformidade de emissão (EU)

Classe	Us (%)	EU (%)
Excelente	> 90	> 90
Bom	90 – 80	90 – 80
Aceitável	80 – 70	80 – 70
Ruim	70 - 60	< 70
Inaceitável	< 60	

Fonte: ASAE (1998), Merriam e Keller (1978).

Com o objetivo de mostrar os efeitos de entupimento após dado período de uso de um emissor, Capra e Scicolone (2004) propõe o uso do índice de redução de vazão (R_d , %) calculado como:

$$R_d = 100 \cdot \left(1 - \frac{Q_m}{Q_t} \right) \quad (6)$$

em que:

Q_m – valor médio da vazão obtido no último ensaio de campo, L h⁻¹;

Q_t – vazão média de 400 novos emissores submetidos à mesma pressão serviço, L h⁻¹.

2.7 Cultivo do pimentão

Segundo Minami e Tessarioli Neto (1994) o gênero *Capsicum* é originário das Américas, ocorrendo desde a porção sul do continente até a sua região central. É uma planta de origem tropical e sub-tropical, necessitando de temperaturas moderadamente elevadas durante o seu ciclo produtivo.

A temperatura ideal para a produção das mudas deve variar entre 26 e 30°C, enquanto que plantas adultas atingem maiores produções sob temperaturas mais amenas, variando entre 19 e 21°C. A ocorrência de temperaturas inferiores a 15°C e superiores a 35°C são prejudiciais ao desenvolvimento da cultura (FILGUEIRA, 2003). Em cultivos protegidos o intervalo para máxima produtividade do pimentão situa-se entre 22 e 26°C (MINAMI; TESSARIOLI NETO, 1994). Além da temperatura, efeitos como luminosidade, pragas, doenças, acidez e salinidade da água e do solo podem afetar o seu desenvolvimento.

As plantas são arbustivas, com altura entre 0,5 e 1,5m e raízes pivotantes que podem chegar a 1,0 m de profundidade sem muito desenvolvimento lateral. Suportam uma carga leve de frutos sem tombar, no entanto, cultivares recentemente desenvolvidas requerem tutoramento para suportar o peso dos frutos (FILGUEIRA, 2003). Esta prática cultural é fundamental para manter os frutos livres de doenças, aumentar a eficiência na aplicação de defensivos agrícolas, prolongar o período de colheita e aumentar a produtividade.

O pimentão adapta-se melhor em solos de textura média, profundos e bem drenados. A planta possui moderada tolerância à acidez do solo, sendo beneficiada pela calagem, processo no qual o pH deve ser elevado para 6 – 6,5 e a saturação por bases para 70%, já que a planta é exigente em cálcio e magnésio. A falta do elemento cálcio promove a podridão apical dos frutos (FILGUEIRA, 1971 apud MINAMI; TESSARIOLI NETO, 1994).

A densidade de plantio exerce substancial influência sobre a produtividade da cultura. O espaçamento recomendado entre linhas de plantio varia entre 1,0 e 1,2m e de 0,3 e 0,7m entre plantas. Em casa de vegetação o espaçamento adotado por ser reduzido.

O pimentão é bastante exigente quanto ao teor de água no solo. Segundo Filgueira (2003), 80% ou mais de água disponível deve ser mantida no solo para o pleno desenvolvimento da cultura. Os estádios de desenvolvimento mais sensíveis ao déficit hídrico são os de frutificação e colheita. O excesso de água no solo não é tolerado pelo pimentão, tendo como consequência a redução no número e peso dos frutos.

A irrigação de pimentão pode ser realizada mediante o emprego de diferentes sistemas de irrigação, destacando-se: irrigação por sulcos, aspersão e gotejamento.

A colheita dos frutos verdes ocorre a partir de 80 e 110 dias após a emergência, conforme a precocidade da cultivar, temperatura, entre outros fatores, prolongando-se por 100 dias ou mais. Na ocasião da colheita os frutos devem ter entre 14 e 18 cm de comprimento, coloração verde-brilhante e consistência firme. Segundo Filgueira (2003), existe uma tendência crescente na comercialização de frutos maduros, apresentando coloração vermelha, amarela, alaranjada, creme ou roxa.

O pimentão é produzido no Brasil tanto para consumo interno quanto para exportação, o que o qualifica como uma das olerícolas de maior importância econômica do país, principalmente para a região Sudeste (MARCUSI; GODOY; VILLAS BOAS, 2004). Além do seu consumo *in natura*, o fruto pode ser processado para elaboração de condimentos e corante alimentício (MINAMI; TESSARIOLI NETO, 1994).

Segundo Pereira (1990), a produtividade média varia de 20 a 40 Mg ha⁻¹, podendo atingir até 80 Mg ha⁻¹, com produção 12 a 15 frutos por planta. Já Filgueira (2003) afirma que a produtividade é variável, podendo ultrapassar 50 Mg ha⁻¹. Para o estado de São Paulo a produção máxima é obtida entre os meses de Janeiro e Março (MINAMI; TESSARIOLI NETO, 1994). Dados do Instituto de Economia Agrícola do Estado de São Paulo - IEA (2005) do ano de 2004 mostram que foram cultivados 2.550 ha e produzidas 69.752 Mg de pimentão no Estado de São Paulo, resultando numa produtividade média de 27,3 Mg ha⁻¹. O valor total de produção de pimentão para o estado foi de 38,2 milhões de reais.

A classificação atualmente mais aceita de frutos de pimentão seguem as normas definidas pela Companhia de Entrepostos e Armazéns Gerais de São Paulo - CEAGESP, uma vez que as normas oficiais (Portaria número 855, de 27/11/1975) estão desatualizadas.

2.8 Material e métodos

2.8.1 Local e planejamento experimental

O presente trabalho foi conduzido no Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, localizada no município

de Piracicaba (coordenadas geográficas 22°42' de latitude sul e 47°38' de latitude oeste, 540 m de altitude), Estado de São Paulo.

A pesquisa foi realizada em três etapas distintas, sendo a primeira realizada em laboratório e as duas restantes em uma casa de vegetação localizada no campo experimental.

Na etapa de laboratório foram realizados ensaios para determinação das curvas vazão *versus* pressão e coeficientes de variação de fabricação para os dois tipos de gotejadores utilizados no experimento: labirinto e microtubo.

Em campo foram realizadas duas etapas. Na primeira, que contou com duas repetições, foram cultivadas plantas de pimentão (*Capsicum annum*, L) em vasos irrigados por sistemas de irrigação por gotejamento, dispondo de diferentes tratamentos e fontes de água (potável e água residuária).

O primeiro ciclo de cultivo do pimentão foi realizado predominantemente na estação do inverno, entre os dias 19 de Maio e 5 de Setembro de 2005, totalizando 110 dias de coleta de dados após o transplântio das mudas. O ciclo seguinte foi realizado nas estações da Primavera e Verão, entre os dias 11 de Outubro de 2005 e 31 de Janeiro de 2006, totalizando 112 dias de coleta.

A terceira etapa da pesquisa também foi realizada em casa de vegetação, consistindo em um ensaio com duração total de 500 horas, nas quais os dois tipos de gotejadores foram submetidos a dois tratamentos distintos da água residuária que abastecia as linhas laterais de gotejadores.

A seguir será descrita a montagem das instalações experimentais de laboratório e de campo, frequência de tomada e descrição dos dados coletados.

2.8.2 Montagem e descrição das instalações experimentais

2.8.2.1 Primeiro experimento

A primeira etapa experimental foi realizada em um circuito hidráulico instalado no Laboratório de Irrigação (Figura 1). Nestes ensaios foram tomados, aleatoriamente, 60 gotejadores novos para cada tipo e instalados em linhas laterais de polietileno de 16mm de

diâmetro e comprimento de 6 m, de forma que cada linha lateral de gotejadores continha 15 unidades do mesmo modelo com espaçamento regular de 0,4 m (o mesmo adotado na etapa posterior de campo, em função do espaçamento recomendado para a cultura do pimentão).

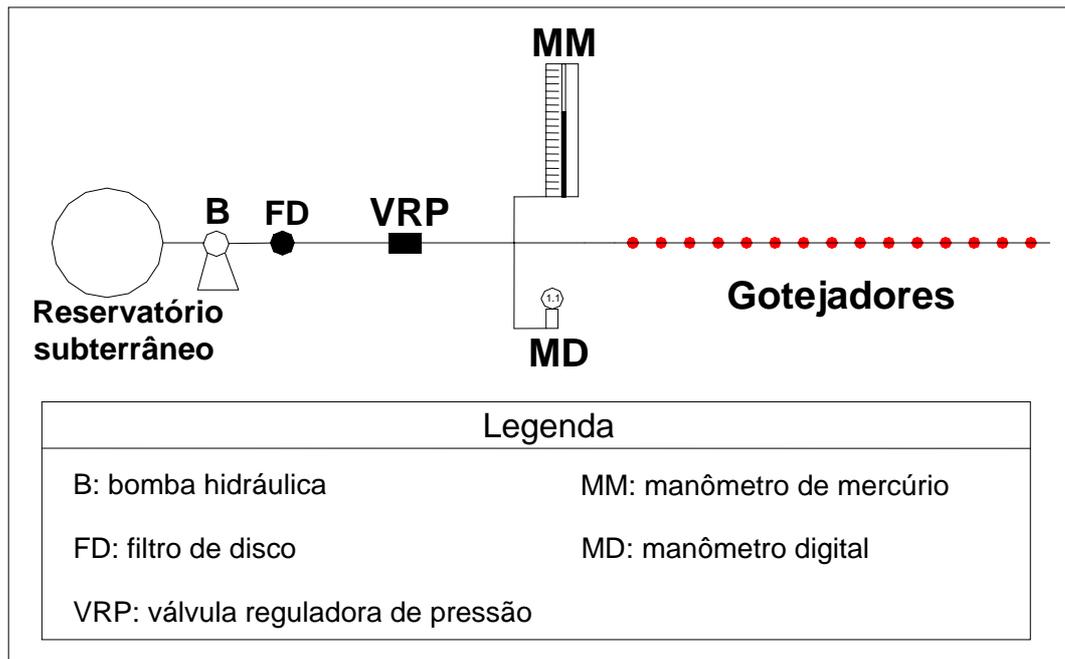


Figura 1 - Esquema da instalação experimental utilizada no laboratório

As vazões destes gotejadores foram medidas para 6 valores distintos de pressão, variando regularmente entre 50 e 200 kPa. O tempo de coleta de água em recipientes apropriados foi variado, a fim de se obter um volume mínimo de 500 mL, que foi pesado em balança digital com precisão de 0,1 g. A pressão de serviço da linha foi estabilizada a partir do uso de uma válvula reguladora de pressão instalada em seu início e monitorada a partir de dois manômetros, um digital com fundo de escala de 1.000 kPa ($10,0 \text{ kgf cm}^{-2}$) e precisão de 10 kPa ($0,1 \text{ kgf cm}^{-2}$) previamente calibrado, e outro de coluna de mercúrio. Inicialmente, foi estabelecida uma relação entre as medidas obtidas a partir das leituras dos dois manômetros. Este procedimento foi realizado visando maior confiabilidade na regulação da pressão, uma vez que o manômetro digital apresentava variações mais pronunciadas que a coluna de mercúrio.

Nesta etapa foi utilizada água tratada de abastecimento e sua temperatura foi monitorada durante a execução dos ensaios.

Os gotejadores estudados do tipo labirinto foram da marca Plastro, modelo Tufftif. Segundo informações contidas no catálogo do fabricante este modelo possui elevada resistência ao entupimento e vazão nominal de $2,1 \text{ L h}^{-1}$ para uma pressão de serviço de 100 kPa (1,0 bar). São recomendados para irrigação de pomares, viveiros, jardins, estufas de hortaliças e flores. Já os microtubos foram fabricados pela Plasnova Tubos. O modelo utilizado foi de cor amarela, que possui diâmetro interno nominal de 0,6 mm. Este gotejador foi ensaiado em laboratório com três comprimentos distintos 70, 75 e 80 cm. O diâmetro médio do microtubo foi medido por meio de um perfilômetro, a partir de uma amostra de 10 unidades, para comparação com o valor fornecido pelo fabricante.

Com base nas curvas vazão-pressão obtidas nestes ensaios de laboratório para o gotejador do tipo labirinto e para os microtubos com medidas de 70, 75 e 80 cm, determinou-se o valor do comprimento do gotejador do tipo microtubo a ser adotado nas etapas de campo para que a vazão nominal deste gotejador coincidissem com a do gotejador do tipo labirinto.

2.8.2.2 Segundo experimento

A água residuária utilizada nos experimentos de campo foi proveniente da Estação de Tratamento de Esgoto - ETE Piracicamirim, localizada em área anexa ao Campus da ESALQ-USP. Esta ETE trata os esgotos domésticos gerados pelos bairros circunvizinhos com vazão de 206 L s^{-1} e eficiência de remoção de Demanda Biológica de Oxigênio da ordem de 95%, através da combinação de dois tipos de tratamentos: anaeróbio e aeróbio. O primeiro é realizado em reatores anaeróbios de fluxo ascendente e o segundo em sistema de lodos ativados. O efluente líquido do tratamento de esgoto é descartado no ribeirão Piracicamirim. Nesse ponto foi instalada uma tubulação de PVC com um registro na extremidade para coleta da água residuária que abastecia a instalação experimental. Esta última foi montada conforme esquema representado na Figura 2 a seguir.

A casa de vegetação utilizada no experimento foi do tipo arco simples, de dimensões 20 x 7 m e pé direito de 2,5 m. As laterais são compostas de telas antiafídeas (comercialmente

conhecidas como sombrite) e cortinas de polietileno móveis e transparentes, de 0,10 mm de espessura.

Verifica-se pela Figura 2 que foram instaladas 4 unidades distintas e independentes de irrigação por gotejamento: a primeira (AP) recebe água potável que é armazenada em R2; a segunda (FAD) é abastecida por água residuária armazenada em R1, posteriormente filtrada por uma associação em série de filtros de areia e disco (120 *mesh*); a seguinte (CO₂) é irrigada com água residuária tratada em um filtro lento e armazenada em R3, enriquecida posteriormente pela adição de dióxido de carbono na linha de irrigação por meio de um tubo venturi; a última unidade (UV) recebe água residuária também tratada pelo filtro lento e desinfetada posteriormente com uso de reator ultravioleta. Para visualizar detalhes da instalação experimental, vide figuras do Apêndice 1.

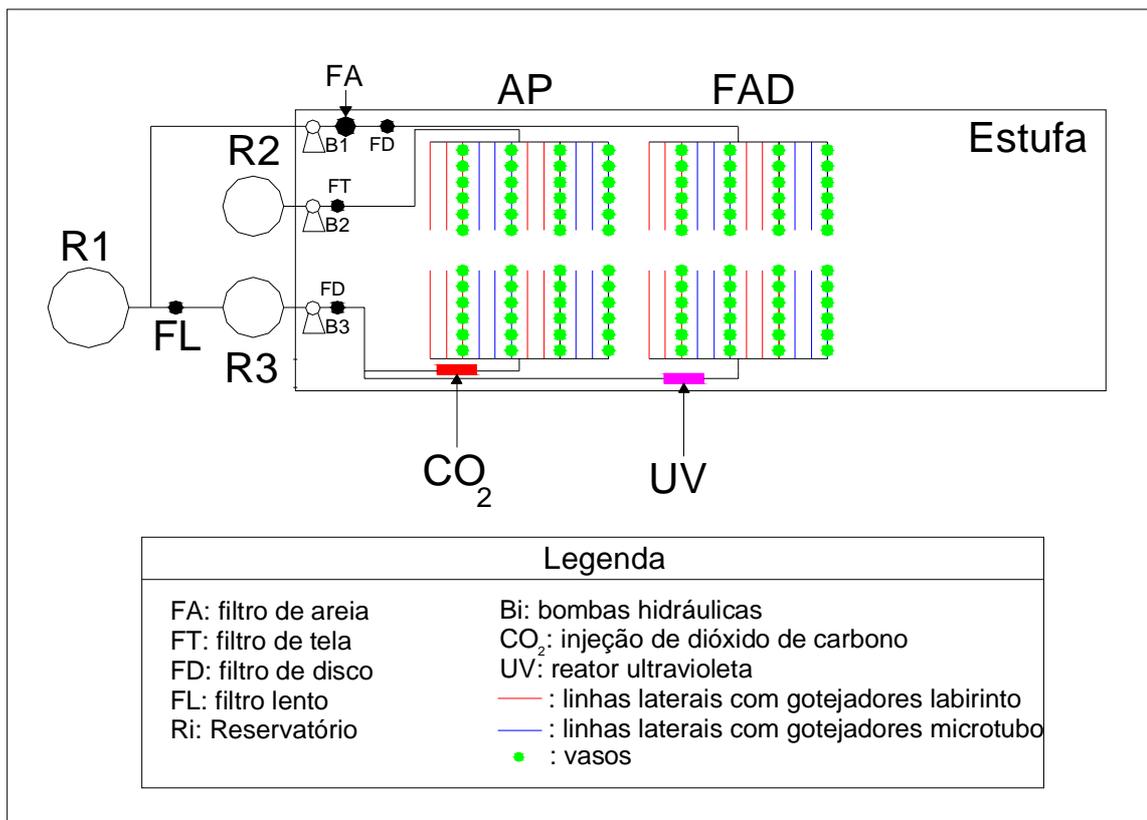


Figura 2 - Esquema da instalação experimental de campo

Para cada um dos 4 tratamentos de água, foram utilizados dois tratamentos distintos relacionados à forma de aplicação de água, por meio de gotejadores do tipo labirinto e microtubo. Desta forma, o experimento contou com 2 fatores de estudo: tipos de água (em função da fonte e dos tratamentos) e tipos de gotejadores. O primeiro fator continha 4 níveis e o segundo 2, totalizando 8 tratamentos distintos. O delineamento experimental foi em um esquema fatorial 4 x 2.

Nos dois ciclos de cultivo da segunda etapa experimental de campo foram utilizados gotejadores novos, instalados nas linhas laterais de polietileno de 16 mm que também foram repostas ao término da primeira repetição.

A água residuária foi transportada em caixa d'água de 1.000 L, com frequência semanal, desde o ponto de coleta instalado na descarga da ETE até o reservatório R1. Este foi instalado em local apropriado, acima dos demais reservatórios e do filtro lento, de forma que todo escoamento a partir do mesmo ocorresse em função do desnível gravitacional.

Em cada unidade de irrigação foram cultivadas 12 plantas de pimentão em vasos com capacidade de 12 L, sendo 6 irrigadas com microtubos e as 6 restantes irrigadas com gotejadores do tipo labirinto. Cada vaso foi irrigado a partir de um único emissor. Nestas unidades de irrigação foram instaladas 6 linhas laterais para cada tipo de gotejador, com 2,4 m de comprimento, contendo 6 emissores espaçados regularmente de 0,4 m. O manejo da irrigação foi realizado mediante o controle da tensão da água no solo, sendo que a quantidade de água aplicada por tratamento foi resultante dos valores médios medidos a cada dia. Desta forma, foram instalados 12 tensiômetros, 3 em cada tratamento, a uma profundidade de 20 cm em vasos escolhidos aleatoriamente. As medidas de tensão foram obtidas por meio de um tensímetro digital de punção.

O pimentão cultivado foi um híbrido da empresa Sygenta Seeds do Brasil, denominado "Matador". Segundo informações da empresa, os frutos são da forma retangular, com espessura de polpa de 6 a 8 mm e de cor verde entre 100 e 120 dias e amarelo brilhante entre 130 e 150 dias. A planta é vigorosa e bem adaptada às casas de vegetação. O espaçamento adotado para os vasos foi de 1,0 m entre linhas e 0,4 m entre plantas.

Os tratos culturais, como controle de ervas daninhas e pragas, foram realizados através de catação manual e de aplicação de defensivos agrícolas, apropriados para as seguintes pragas e

doenças: ácaros, moscas brancas e moscas minadoras, oídio, míldio e esclerotínea. Para o controle, foram utilizados os seguintes defensivos agrícolas: enxofre, mancozeb (Dithane), abamectin (Vertimec 18 CE), imidacloprid (Confindor) e calda de detergente a 10%.

Os vasos foram preenchidos com uma camada de brita ao fundo, de cerca de 3cm, com manta sintética em seu topo, constituindo um eficiente sistema de drenagem ao mesmo tempo em que evitava a perda de solo. Foram adicionados aos vasos 11 L de Latossolo Vermelho Amarelo, também conhecido como “Sertãozinho”. O solo utilizado foi previamente peneirado com telas de abertura de 2 mm e pH corrigido pela calagem. As características físicas do solo, incluindo curva de retenção de água, granulometria (metodologia proposta por BOUYOUCUS, 1951) e densidade global (método da proveta) foram determinadas a partir de análises realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Rural. Foram realizados ensaios de campo para determinação da umidade de capacidade de campo, a partir de três amostras, segundo metodologia recomendada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA (1997).

A adubação de fundação foi realizada segundo a recomendação de Tivelli (1998) para a cultura do pimentão, 40 kg ha⁻¹ de N, 600 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. Semanalmente foram realizadas adubações de cobertura com doses de 10 kg ha⁻¹ de N e 12 kg ha⁻¹ de K₂O. Os micronutrientes foram aplicados em solução via foliar a cada 15 dias.

Todas as unidades de tratamento possuíam bomba hidráulica centrífuga de potência 368 W (0,5 cv), hidrômetros para monitoramento da vazão, reguladores de pressão de 100 kPa (15 PSI) e ponto para instalação de manômetro para monitoramento da pressão.

A unidade de irrigação abastecida com água tratada possuía um filtro de tela de 120 *mesh* para remoção de partículas suspensas.

O tratamento com filtros em série de areia e disco é um tratamento convencional utilizado em irrigação por gotejamento. O filtro de areia utilizado foi projetado para uma vazão nominal de 4 m³ h⁻¹ com diâmetro interno de 0,40 m. O filtro de disco era de 120 *mesh*, de 25 mm (1”).

Os dois últimos tratamentos recebiam água residuária filtrada por um filtro lento na taxa de 5,0 m³ m⁻² dia⁻¹ e armazenada em reservatório próprio. A partir da taxa de filtração e da área transversal do elemento filtrante (7,07 10⁻² m²) determinou-se a vazão de alimentação do filtro

lento igual a $14,73 \text{ L h}^{-1}$, a qual foi mantida constante mediante a regulagem de um registro instalado após uma caixa de entrada do afluente com nível d'água constante (Figura 3).

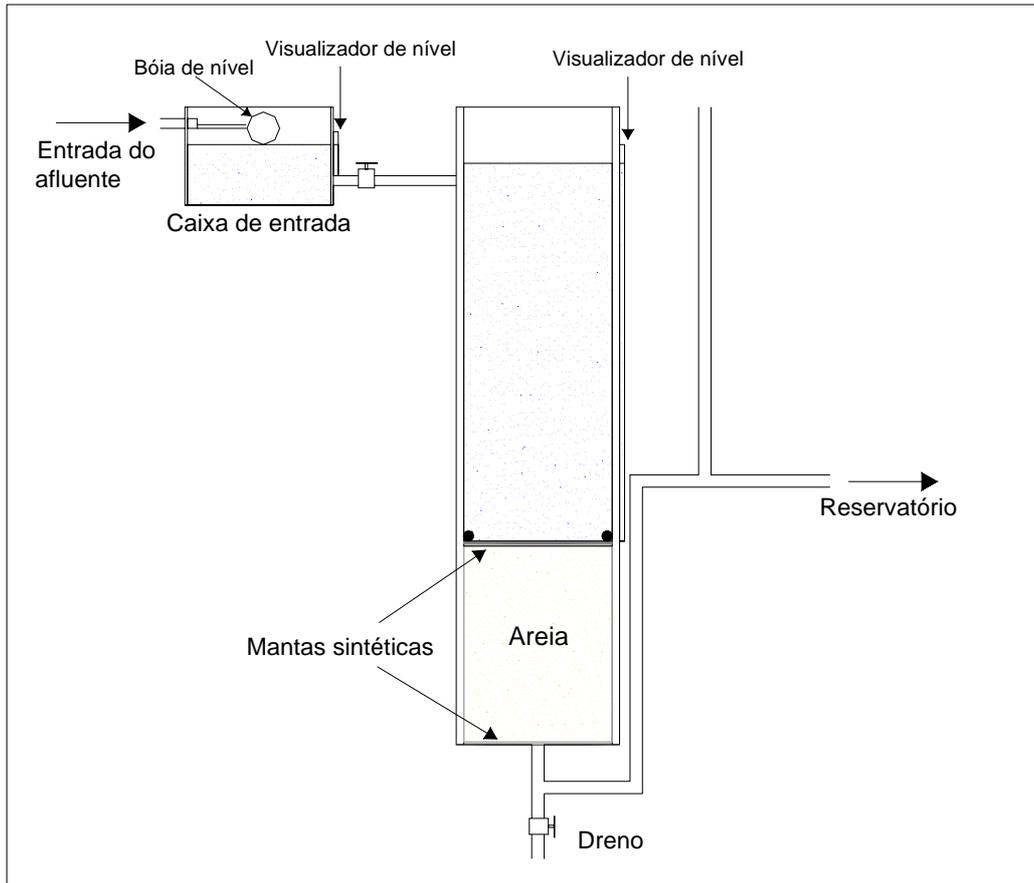


Figura 3 - Desenho esquemático do filtro lento

O filtro lento foi construído com areia grossa de construção civil lavada, seca em estufa à 105°C durante 24 horas e peneirada numa série de 7 peneiras com aberturas entre 1,0 e 0,053 mm, conforme metodologia proposta por Londe e Paterniani (2003). Cada fração de areia peneirada foi pesada para determinação do tamanho efetivo e coeficiente de desuniformidade dos grãos. No interior do filtro lento, construído em um tubo de PVC de diâmetro interno de 0,3 m, foi acomodada uma camada areia de espessura 0,4 m com mantas sintéticas não tecidas em sua base e no topo. As mantas sintéticas não tecidas utilizadas na construção do filtro lento foram da marca Geofort, com gramatura de 150 e 300 g m^{-2} . A manta de maior gramatura foi instalada na

base e no topo da camada de areia, já a de menor gramatura foi colocada sobre esta última, apenas na parte superior da camada de areia.

Segundo Di Bernardo (1993), o uso de mantas sintéticas não tecidas sobre a areia permite elevar a taxa de filtração da água e reduzir a espessura da camada de areia, além de facilitar a limpeza do filtro após o término da carreira de filtração. É importante frisar que o filtro lento operou de forma intermitente e de forma automática, de acordo com o consumo de água das parcelas de irrigação que possuíam injeção de dióxido de carbono e desinfecção por meio de radiação ultravioleta.

Um filtro de disco de 120 *mesh* foi instalado após a bomba, antes dos tratamentos de desinfecção da água.

A injeção de dióxido de carbono do terceiro tratamento foi realizada por meio de um tubo Venturi, instalado no início da linha de derivação do tratamento. A taxa de injeção adotada foi de 2 L min⁻¹, calculada a partir da solubilidade máxima do gás na água à temperatura de 25°C e monitorada a partir da leitura de um rotâmetro. O dióxido de carbono, em contato com a água, forma ácido carbônico, promovendo queda de seu pH. Esperava-se que, com este tratamento, houvesse redução na concentração de microorganismos presentes na água, reduzindo, portanto, o risco potencial de entupimento dos emissores. Rodriguez Robles (2003), em pesquisa de campo com adição de dióxido de carbono à água de irrigação para fins de adubação verificou que os emissores das linhas laterais de irrigação que recebiam a injeção deste gás tiveram problemas de entupimento reduzidos.

O quarto tratamento continha um reator ultravioleta para desinfecção da água residuária previamente filtrada. Este reator é constituído por uma lâmpada ultravioleta de 30 W, de 26 mm de diâmetro, no interior de um tubo cilíndrico de aço inox e pode suportar uma pressão de 700 kPa (70 mca). O reator possuía diâmetro de 100 mm e distância entre a entrada e saída de água igual a 50 cm. Para Aguiar et al. (2002) uma distância máxima da lâmpada inferior a 75 mm é recomendada para aplicações de UV em processos de desinfecção.

Para monitoramento da temperatura e umidade relativa do ar no interior da estufa foi utilizado um termo-higrógrafo digital instalado no centro das unidades e na altura correspondente ao dossel das plantas. As temperaturas máximas e mínimas diárias, bem como os valores máximos e mínimos de umidade relativa registrados no termo-higrógrafo eram lidos diariamente

pela manhã. A partir da média aritmética das temperaturas de máximo e mínimo estimou-se o valor da temperatura média diariamente. Os valores medidos no interior da casa de vegetação foram comparados com os valores registrados pelo Posto Meteorológico da ESALQ localizado no Campus universitário.

O transplântio das mudas de pimentão na primeira fase de cultivo foi realizado 45 Dias Após a Emergência (DAE) e na segunda fase após 50 DAE. Estas foram adquiridas de um viveirista especializado.

A irrigação foi manejada a partir da média das leituras dos tensiômetros em cada tratamento e foi efetuada sempre que este valor superasse $-15,0$ kPa. Frizzone; Gonçalves e Rezende (2001) obtiveram maior produtividade de frutos de pimentão amarelo para valores médios de $-15,0$ kPa para o potencial mátrico. As leituras eram efetuadas diariamente às 8 horas da manhã. Anotou-se o tempo de aplicação de água em cada aplicação para cada tratamento, bem como os valores dos hidrômetros antes e após a irrigação, para controle do volume de água aplicado em cada tratamento.

Os filtros de tela, disco e areia instalados nos tratamentos eram limpos após cada operação de aplicação de água. A limpeza do filtro lento foi efetuada somente quando a perda de carga atingiu $0,60$ m. Neste processo a água no seu interior foi drenada e as mantas sintéticas colocadas sobre o topo da camada de areia foram limpas com um jato de água limpa.

A casa de vegetação possuía cortinas móveis que eram suspensas logo pela manhã e fechadas ao final das tardes para manutenção de temperatura interna adequada às plantas. Eventualmente, em função das baixas temperaturas registradas nos dias mais frios, as cortinas permaneciam fechadas durante todo o dia.

2.8.2.2.1 Ensaio e medições realizadas

2.8.2.2.1.1 Avaliação da qualidade e eficiência dos tratamentos de água

Para avaliação dos parâmetros de qualidade das diferentes fontes de água utilizadas na pesquisa, bem como na determinação da eficiência dos diferentes tratamentos de água empregados, foram realizadas 6 coletas de água na primeira etapa de campo do experimento e 8

amostragens na segunda (com intervalo regular de 15 dias). As amostras de água foram coletadas em 6 pontos: água residuária coletada na saída do reservatório R1 (AR), água potável coletada na saída do reservatório R2 (AP), efluente do filtro lento (FL), efluente da filtração com filtros de areia e disco (FAD), efluente do tratamento com injeção de dióxido de carbono (CO₂) e efluente do tratamento com radiação ultravioleta (UV).

A Tabela 12 apresenta os parâmetros analisados e os métodos empregados para cada ponto de amostragem de água.

Tabela 12 - Parâmetros físicos, químicos e biológicos da água analisados e métodos de análise

PARÂMETROS	MÉTODOS
Físico	
Sólidos em suspensão (mg L ⁻¹)	Gravimetria
Turbidez (NTU)	Nefelometria
Químico	
pH	Leitura em pHmetro
Condutividade elétrica	Leitura em Condutivímetro
Mn (ppm)	Espectrofotometria
Ferro Total (ppm)	Espectrofotometria
Biológico	
E. coli (NMP) (100mL) ⁻¹	Método do substrato definido, utilizando reagentes e cartelas da IDEXX Laboratories Inc. (processo cromogênico)
DBO ₅ (mg L ⁻¹)	Leitura inicial e após 5 dias em Oxímetro

2.8.2.2.1.2 Monitoramento da uniformidade de distribuição de água às plantas

No primeiro ciclo de cultivo da etapa experimental de campo foram realizados 7 ensaios de vazão a cada 15 dias, nos quais foram coletados e medidos os volumes de água em recipientes plásticos, após um tempo de funcionamento do sistema de 6 minutos. Na segunda repetição foram realizados 8 ensaios com a mesma frequência. Os ensaios foram realizados para os dois tipos de gotejadores, separadamente para cada tratamento, tomando-se a medida de pressão na entrada da unidade de irrigação por meio de um manômetro digital. Com os dados coletados pode-se obter o coeficiente estatístico de emissão (Us), o coeficiente de uniformidade de emissão (EU) e as vazões médias para cada tipo de gotejador em cada tratamento.

2.8.2.2.1.3 Determinação da produção e componentes de produção do pimentão

Na primeira repetição experimental foram realizadas 5 colheitas dos frutos de pimentão, entre os 72 e 105 dias após o transplântio das mudas, totalizando 33 dias. Na segunda repetição ocorreram 6 colheitas entre o mesmo intervalo após o transplântio das mudas, totalizando os mesmo 33 dias.

Depois de colhidos, os frutos foram identificados por planta de origem, pesados e medidos o seu comprimento e largura por meio de um paquímetro digital. Desta forma pode-se analisar as seguintes variáveis para cada tratamento: produção por planta, número de frutos por planta, peso, comprimento e largura dos frutos por tratamento. De posse de todos os frutos colhidos em cada repetição, procedeu-se uma análise estatística dos dados. Foram realizadas análises de variância com posterior comparação das médias através do teste de Tukey.

2.8.2.3 Terceiro experimento

A última etapa experimental foi realizada em casa de vegetação e consistiu em um ensaio de duração de 500 horas, nas quais os gotejadores utilizados na primeira etapa experimental de laboratório foram submetidos a dois tratamentos da água residuária: filtro de disco (120 *mesh*) e filtro de disco (120 *mesh*) associado ao reator ultravioleta. Esses tratamentos foram escolhidos a partir dos resultados obtidos na segunda etapa experimental, na qual ficou evidenciado o potencial do uso da radiação ultravioleta associada à filtração lenta na prevenção do entupimento dos gotejadores. Por razões práticas optou-se por não utilizar o filtro lento neste experimento.

Para a realização deste ensaio foram montadas duas bancadas de madeira para dar suporte às linhas laterais de gotejamento. Foram instalados dois circuitos hidráulicos fechados, um para cada tratamento, os quais possuíam reservatórios próprios (Figura 4).

Cada circuito possuía uma bomba centrífuga de 368 W (0,5 cv), hidrômetro e regulador de pressão de 100 kPa (15 PSI) e 4 linhas laterais de 6m, sendo duas com gotejadores do tipo labirinto e duas com microtubos de 75 cm. Desta forma, cada tratamento de água possuía 30 gotejadores de cada tipo, espaçados regularmente em 0,40 m. A água emitida pelos gotejadores era coletada em tubos de PVC de 40 mm de diâmetro, convergindo para uma calha construída de PVC que, por sua vez, retornava o fluxo ao reservatório de origem.

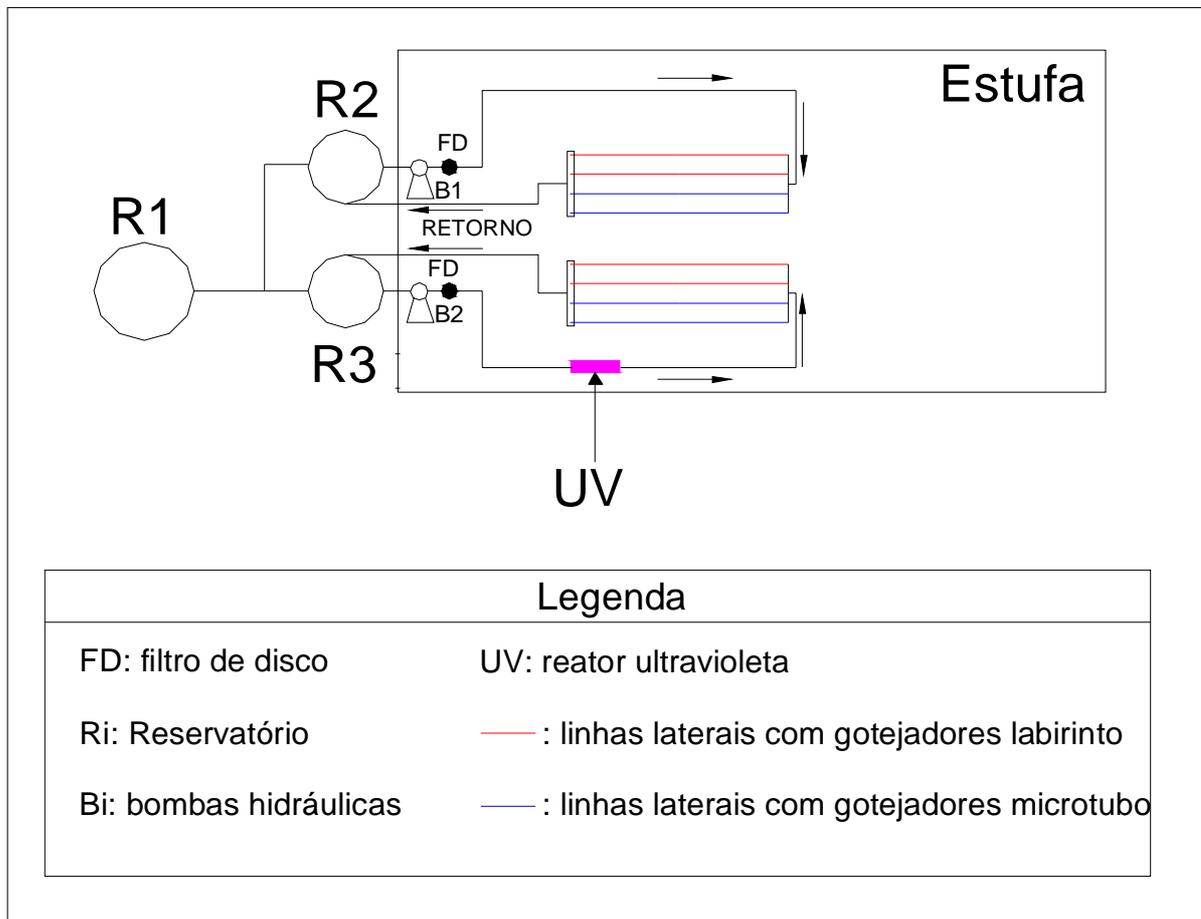


Figura 4 – Esquema da instalação experimental da última etapa de campo

O sistema foi automatizado e programado para funcionar 20 horas por dia e as bombas centrífugas foram protegidas pela instalação de bóias elétricas de nível inferior. No intervalo de 4 horas sem irrigação era efetuada a limpeza nos filtros de disco.

Foram realizados seis ensaios de vazão para acompanhamento e avaliação do processo de entupimento dos emissores. O primeiro foi realizado no início de operação do sistema, ou seja, no instante zero. Os demais foram realizados a cada 100 horas de funcionamento do sistema, totalizando 500 horas. Nestes ensaios o tempo de coleta de água foi de 6 minutos e o volume coletado em recipientes plásticos foi medido por meio de provetas graduadas.

A partir dos dados coletados, pode-se avaliar o desempenho dos dois tratamentos de água na prevenção do entupimento dos dois tipos de gotejadores, bem como comparar o desempenho

dos gotejadores do tipo labirinto com os microtubos em um tempo prolongado de uso com água residuária.

2.9 Resultados e Discussões

2.9.1 Resultados do primeiro experimento

A Tabela 13 contém os resultados das vazões médias, desvio padrão e coeficiente de variação dos dados obtidos, para cada pressão de serviço, nos ensaios de laboratório para o gotejador do tipo labirinto e as 3 medidas ensaiadas do gotejador do tipo microtubo: 80 cm (M80), 75 cm (M75), 70 cm (M70). A temperatura da água medida durante os ensaios variou entre 24 e 26,5°C.

Tabela 13 – Vazões médias e medidas de dispersão dos dados obtidos a partir de 60 unidades para cada gotejador ensaiado

Tipo de gotejador	Pressão (kgf cm ⁻²)	0,5	0,8	1,1	1,4	1,7	2,0
	Pressão (kPa)	49,1	78,5	107,9	137,3	166,8	196,2
Labirinto	Q média (L h ⁻¹)	1,29	1,66	1,97	2,23	2,47	2,68
	Desv. Pad. (L h ⁻¹)	0,04	0,05	0,05	0,06	0,06	0,07
	CV _f (%)	3,04	2,82	2,58	2,50	2,50	2,45
M 80	Q média (L h ⁻¹)	1,03	1,56	2,01	2,40	2,79	3,18
	Desv. Pad. (L h ⁻¹)	0,04	0,04	0,04	0,08	0,09	0,09
	CV _f (%)	3,73	2,32	2,23	3,44	3,13	2,77
M 75	Q média (L h ⁻¹)	1,03	1,54	2,02	2,48	2,90	3,30
	Desv. Pad. (L h ⁻¹)	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,10
	CV _f (%)	2,45	2,60	2,53	2,49	2,58	2,96
M70	Q média (L h ⁻¹)	1,13	1,65	2,14	2,62	3,06	3,47
	Desv. Pad. (L h ⁻¹)	0,03	0,07	0,07	0,07	0,08	0,08
	CV _f (%)	2,83	3,97	3,15	2,86	2,73	2,44

A Tabela 13 mostra apenas os dados médios obtidos para cada gotejador ensaiado. A partir de todos os dados coletados (60 repetições para cada gotejador), foram elaborados os gráficos das curvas vazão *versus* pressão (Figuras 5 e 6).

Como esperado, conforme se aumenta o comprimento do microtubo, menor é a vazão obtida para uma dada pressão de serviço (Figura 5). Além disso, verifica-se um perfil das curvas vazão *versus* pressão quase linear para os microtubos, indicando que os valores dos expoentes “x” dos mesmos são próximos da unidade, caracterizando fluxo laminar.

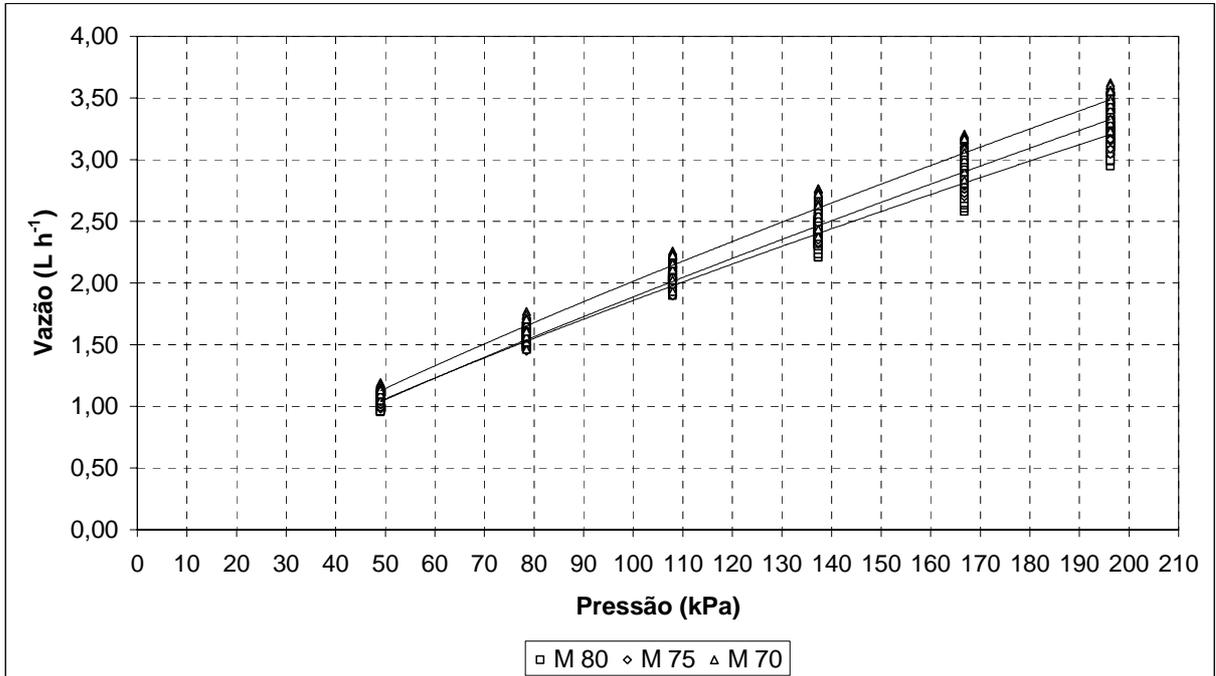


Figura 5 – Curvas vazão-pressão dos microtubos ensaiados

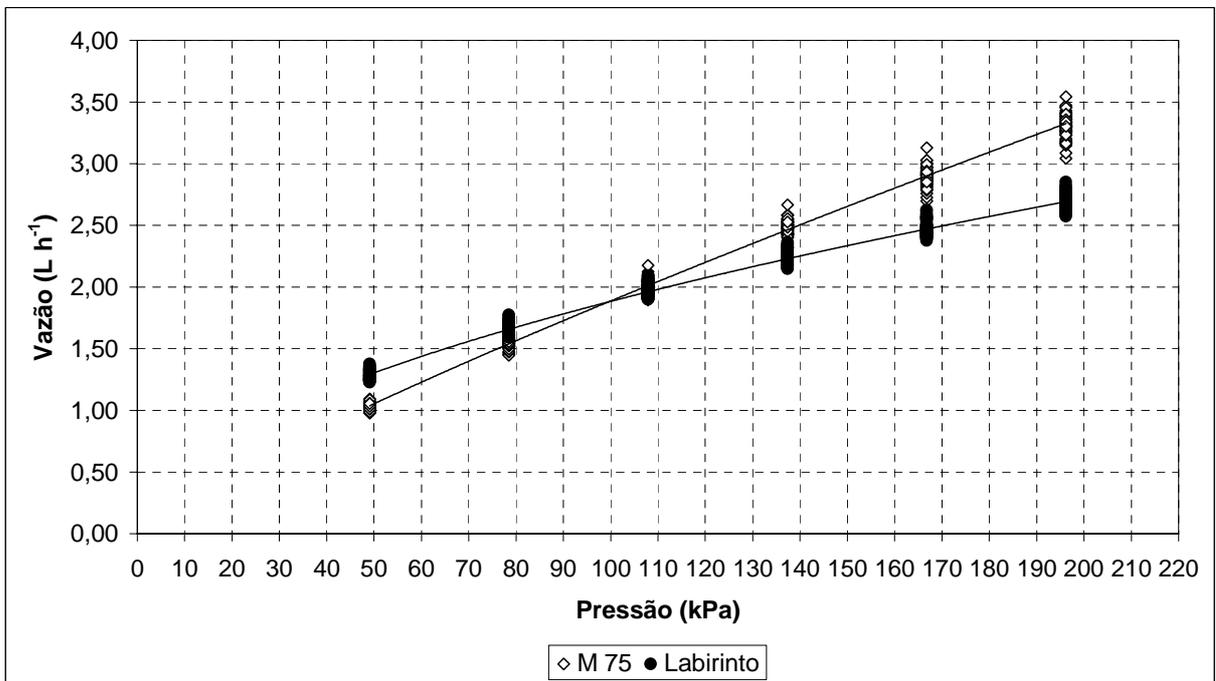


Figura 6 – Curvas vazão-pressão dos gotejadores tipo labirinto e microtubo com 75 cm de comprimento

Nota-se pelo gráfico da Figura 6, que as curvas dos gotejadores tipo labirinto e microtubo com 75 cm de comprimento, cruzam-se exatamente com a pressão de serviço da linha em 100 kPa. Esta mesma pressão é recomendada pelo fabricante do gotejador tipo labirinto e foi adotada nas etapas posteriores de campo. Desta forma, verifica-se que as condições de operação dos dois tipos de gotejadores são muito próximas num intervalo de pressão entre 90 e 110 kPa.

A Tabela 14 contém as equações obtidas nos ensaios vazão-pressão para o gotejador tipo labirinto e os três comprimentos de microtubos.

Tabela 14 – Equações vazão-pressão para os gotejadores ensaiados em laboratório

Gotejador	Equação	R²
Labirinto	$Q = 0,1644 H^{0,5296}$	0,9889
M80	$Q = 0,0449 H^{0,8083}$	0,9926
M75	$Q = 0,0394 H^{0,8404}$	0,9955
M70	$Q = 0,0474 H^{0,8141}$	0,9937

Os expoentes das curvas vazão *versus* pressão obtidos tanto para o gotejador tipo labirinto (aproximadamente 0,53) e para o M75 (0,84) são condizentes com os valores apresentados na Tabela 7 (PIZZARO, 1996). Verifica-se também que pelos altos valores de R² obtidos, os dados dos ensaios ajustaram-se bem ao modelo matemático potencial.

Foram realizadas também medidas do diâmetro interno dos gotejadores do tipo labirinto por meio do uso de um perfilômetro. Para isso foram tomadas 10 amostras a partir de diferentes fragmentos do rolo de microtubo. O diâmetro médio obtido foi de 0,52 mm, com desvio padrão da média de 0,03 mm e coeficiente de variação de 6,0%. Esta dispersão em torno da média certamente influenciou os resultados dos valores de coeficiente de variação de fabricação obtidos para os microtubos nas diferentes pressões de serviço ensaiadas (Figura 7).

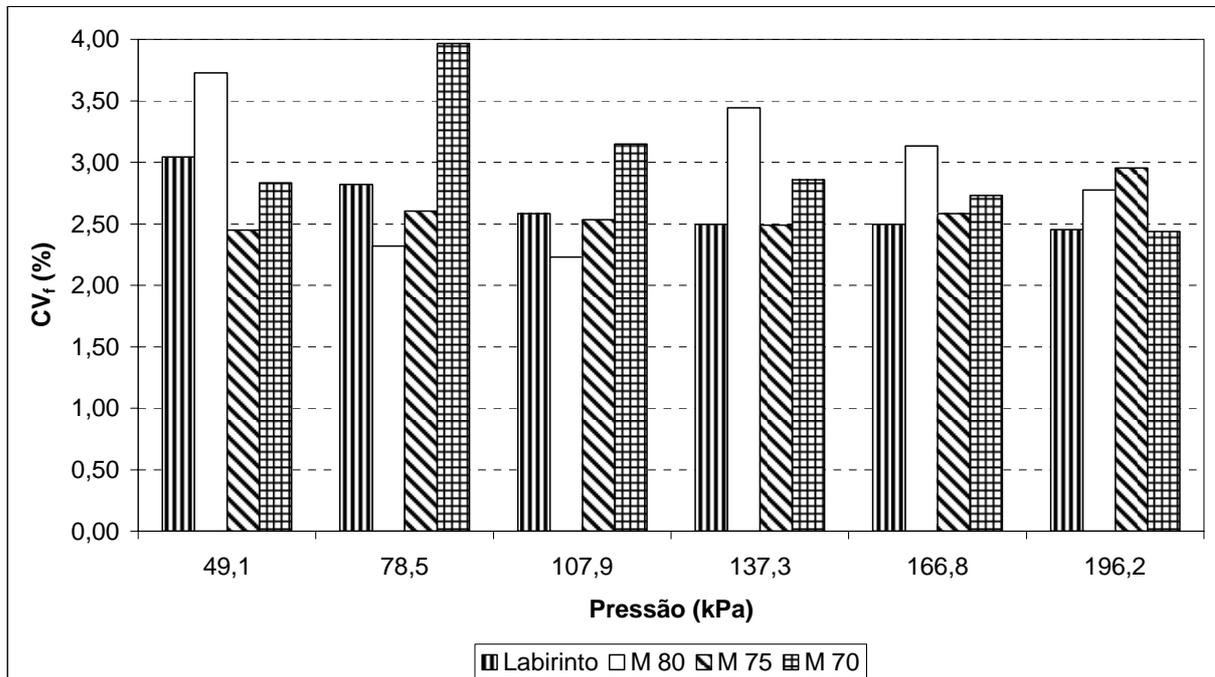


Figura 7 – Variação dos valores do coeficiente de variação de fabricação para cada gotejador em cada pressão de serviço ensaiada

Nota-se na Figura 7, que os valores de coeficiente de variação de fabricação (CV_f) do gotejador do labirinto apresentou uma tendência de queda com a elevação da pressão, sendo de 3,04% com pressão de 49,1 kPa e 2,45% com a pressão de 196,2 kPa. Para o microtubo, independentemente do comprimento, não foi observada qualquer tendência de crescimento ou decaimento dos valores de CV_f em função da elevação da pressão de serviço nos ensaios. No entanto, todos os valores obtidos neste ensaio para este parâmetro indicaram que tanto o gotejador tipo labirinto quanto os microtubos ensaiados podem ser classificados como excelentes (ASAE, 1998). Além disso, para a pressão de 107,9 kPa (mais próxima de 100 kPa) os valores dos coeficientes de variação de fabricação dos gotejadores tipo labirinto e M75 são muito próximos, 2,58% e 2,53%, respectivamente. Cararo (2004) obteve valores de coeficiente de variação de fabricação entre 1,68 e 10,27% para 15 modelos diferentes dentre os gotejadores mais utilizados no Brasil. Destes, 7 modelos apresentaram valores inferiores a 3,00%.

Ao final desta etapa, optou-se pela escolha do microtubo com comprimento de 75 cm, o qual apresentou características operacionais mais próximas do gotejador tipo labirinto para a pressão de serviço de 100 kPa. Além disso, verificou-se que ambos os tipos de gotejadores,

quando novos, apresentam coeficientes de variação de fabricação que os qualificam como excelentes.

2.9.2 Tamanho efetivo de grãos e coeficiente de desuniformidade da areia utilizada no filtro lento

A Tabela 15 contém os resultados da caracterização física da areia grossa de construção civil, lavada e peneirada conforme metodologia descrita anteriormente, utilizada para a construção do filtro lento.

Tabela 15 - Peso retido e peso retido acumulado, em valor absoluto e relativo, em cada peneira

Peneira N°	Abertura (mm)	Peso retido (g)	Peso retido acumulado (g)	Peso retido acumulado (%)	Peso acumulado que passa (%)
18	1,000	-	-	0,00	100,00
35	0,500	9414,87	9414,87	23,95	76,05
40	0,420	9489,53	18904,40	48,09	51,91
50	0,297	11405,60	30310,00	77,11	22,89
60	0,250	1301,51	31611,51	80,42	19,58
100	0,149	6096,73	37708,24	95,93	4,07
140	0,105	933,88	38642,12	98,31	1,69
270	0,053	664,80	39306,92	100,00	0,00
Total		39306,92	-	-	-

O gráfico da Figura 8 a seguir foi construído em escala mono-log a partir dos dados contidos na Tabela 15. O tamanho efetivo dos grãos é obtido pelo ponto correspondente a 10% do peso acumulado que passa pela série de peneiras, enquanto que o coeficiente de desuniformidade é obtido pela razão do valor de diâmetro correspondente a 60% do peso acumulado que passa pelo tamanho efetivo. Estes valores foram determinados graficamente e posteriormente calculados (Tabela 16).

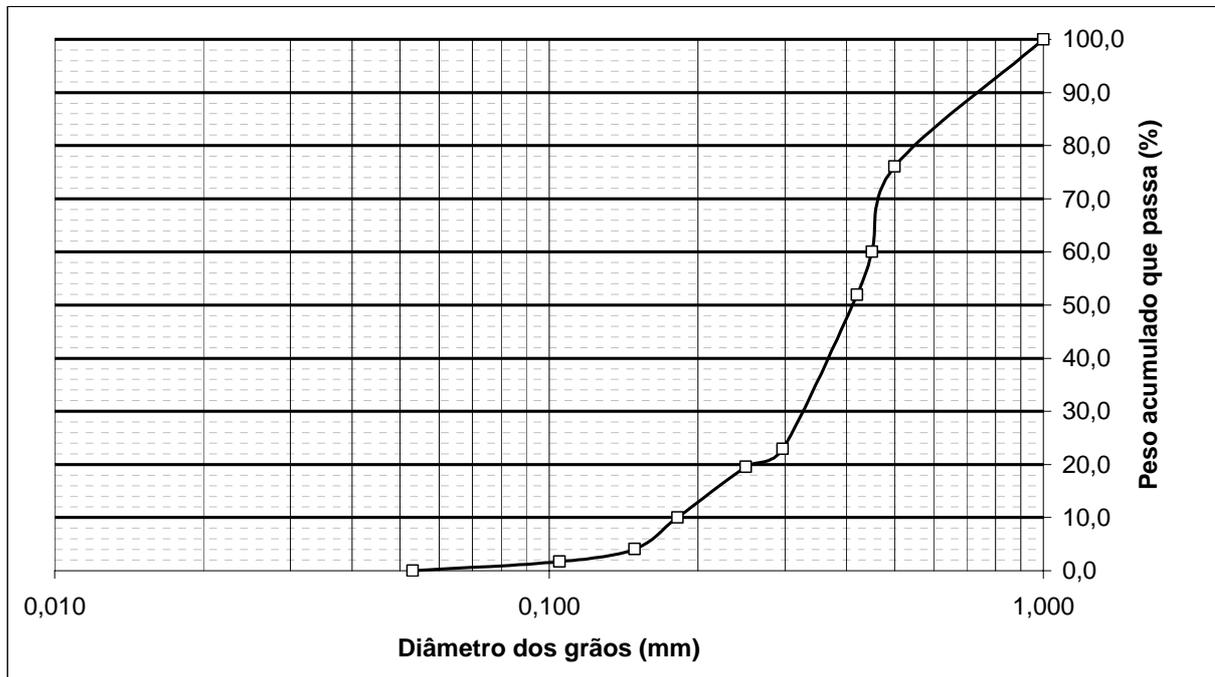


Figura 8 - Curva de distribuição granulométrica da areia

Tabela 16 - Características granulométricas obtidas para a areia do filtro lento e recomendações de outros autores

Tamanho efetivo - D_{10} (mm)	Coefficiente de desuniformidade - D_{60}/D_{10}	Tamanho dos grãos (mm)	Referência
0,18	2,47	0,053 a 1,00	ensaio
0,15 a 0,30	1,5 a 3,0	0,104 a 1,00	Di Bernardo (1993)
0,20	2,40	0,053 a 1,00	Londe e Paterniani (2003)

Os valores obtidos, tanto para tamanho efetivo dos grãos, quanto para o coeficiente de desuniformidade são bastante próximos daqueles determinados por Londe e Paterniani (2003) que utilizaram o mesmo tipo de areia e concordantes com os valores recomendados por Di Bernardo (1993) para a construção de filtro lento.

2.9.3 Características físicas do solo

A análise granulométrica do Latossolo Vermelho Amarelo resultou nas seguintes frações: 17,1% de argila, 11,4% de silte e 71,50% de areia, o qual pode ser classificado como franco-arenoso. Resultados semelhantes foram obtidos por Silva (2002) para o mesmo solo: 18,5% de

argila, 12,0% de silte e 69,5% de areia. O valor da densidade global do solo determinada em laboratório foi de $1,31 \text{ g cm}^{-3}$ e as umidades correspondentes à capacidade de campo e ponto de murcha permanente foram de $0,34 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$ e $0,10 \text{ cm}^3 \text{ cm}^{-3}$, respectivamente.

A curva de retenção do solo, determinada em laboratório, é apresentada na Figura 9 a seguir. O eixo das ordenadas contém os valores de umidade na base de volume e o eixo das abscissas contém os valores de tensão em Bar, mesma unidade de medida dos tensiômetros utilizados em campo. Optou-se por utilizar estas unidades de medida pela facilidade na determinação do volume de água a ser aplicado em cada evento de irrigação durante o experimento de campo. A correlação das duas grandezas na eq. (7) possui coeficiente de correlação R^2 igual a 0,9855.

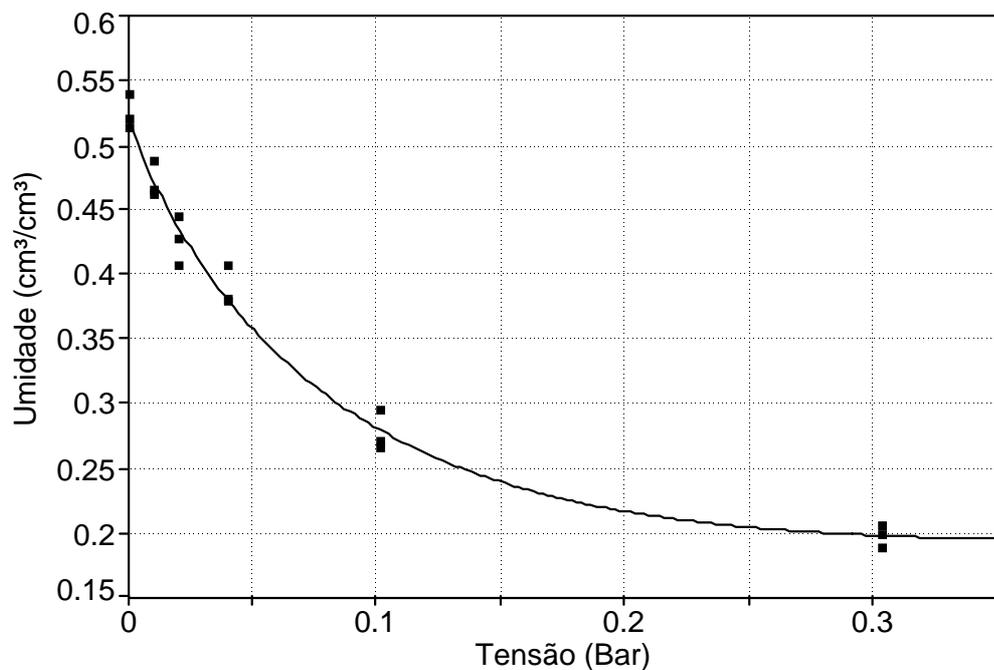


Figura 9 - Curva de retenção da água no solo

$$\theta = 30,280219 - 36,112161.T + 17,015453.T^{1,5} - 29,759385.\exp^{-T} \quad (7)$$

em que:

θ - umidade do solo, $\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$;

T - tensão de água no solo, Bar.

Determinada a umidade atual do solo pelo emprego da eq. (7) e utilizando o valor médio das leituras dos tensiômetros, calculou-se, para cada evento, o tempo de irrigação necessário para elevar a umidade do solo à capacidade de campo.

2.9.4 Resultados do segundo experimento

Serão apresentados a seguir os resultados da primeira e segunda repetições da segunda etapa experimental.

2.9.4.1 Temperatura e umidade relativa do ar no interior e exterior da casa de vegetação

A Figura 10 contém um gráfico com os valores das temperaturas máximas e mínimas medidas no interior da casa de vegetação e no ambiente externo, medidas durante o período de 1 a 110 dias após transplante (DAT) na primeira repetição deste experimento. Os valores médios da temperatura máxima no interior da estufa e no ambiente externo foram de $36,1^{\circ}\text{C}$ e $26,2^{\circ}\text{C}$, respectivamente, uma expressiva diferença de aproximadamente 10°C . Já os valores médios da temperatura mínima determinadas para o interior e exterior da estufa foram de $13,4^{\circ}\text{C}$ e $12,5^{\circ}\text{C}$ para o período experimental. Esta diferença foi de aproximadamente 1°C .

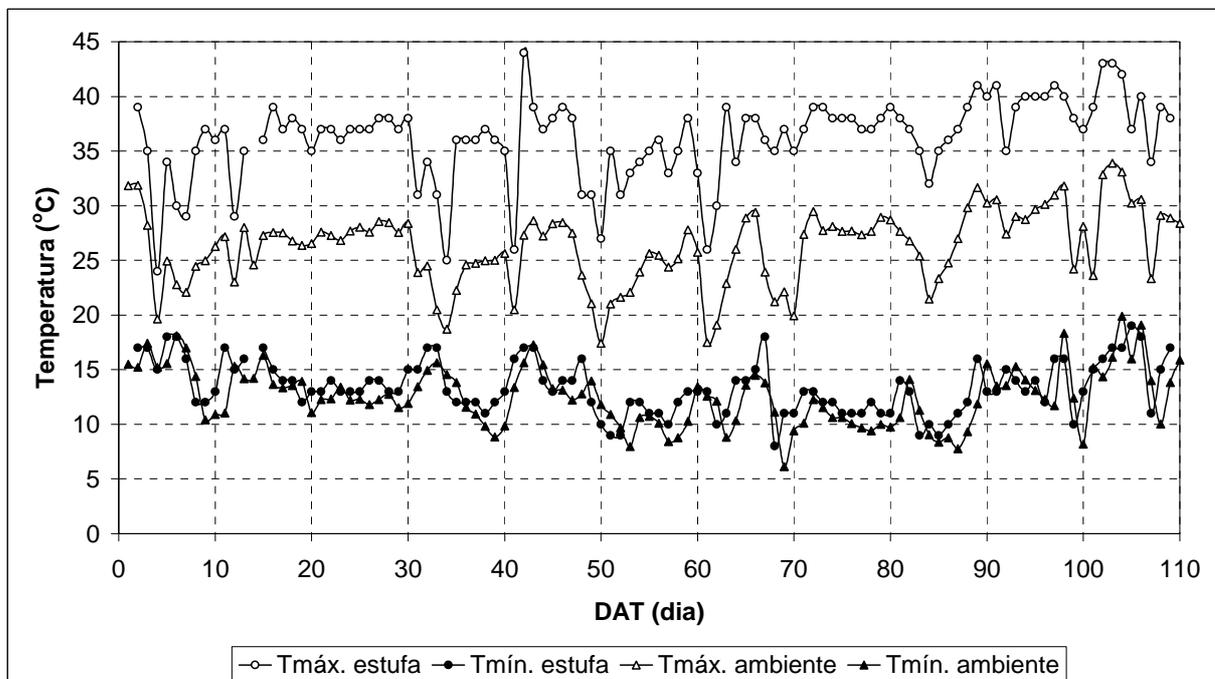


Figura 10 - Gráfico das temperaturas máxima e mínima diárias, na primeira repetição

De acordo com Filgueira (2003), os valores médios das temperaturas extremas medidas no interior da estufa foram próximos daqueles recomendados, entre 15°C e 35°C. Já Minami e Tessarioli Neto (1994) determinam que a temperatura ideal para o cultivo do pimentão em ambiente protegido compreende o intervalo de 22 a 26°C. Em aproximadamente 78% dos dias a temperatura máxima ultrapassou o valor de 35°C e a temperatura mínima medida foi inferior a 15°C em 69% dos dias. Devidos às elevadas temperaturas observadas na primeira repetição do experimento, decidiu-se por instalar uma tela metálica de proteção (conhecida comercialmente como Aluminet) no interior da estufa, com poder de reflexão da radiação solar da ordem de 50%.

O gráfico da Figura 11 contém as medidas dos valores de temperatura interna e externa registrados na segunda repetição desta etapa experimental. Os valores médios da temperatura máxima dentro e fora da estufa foram de 36,4°C e 29,7°C, respectivamente.

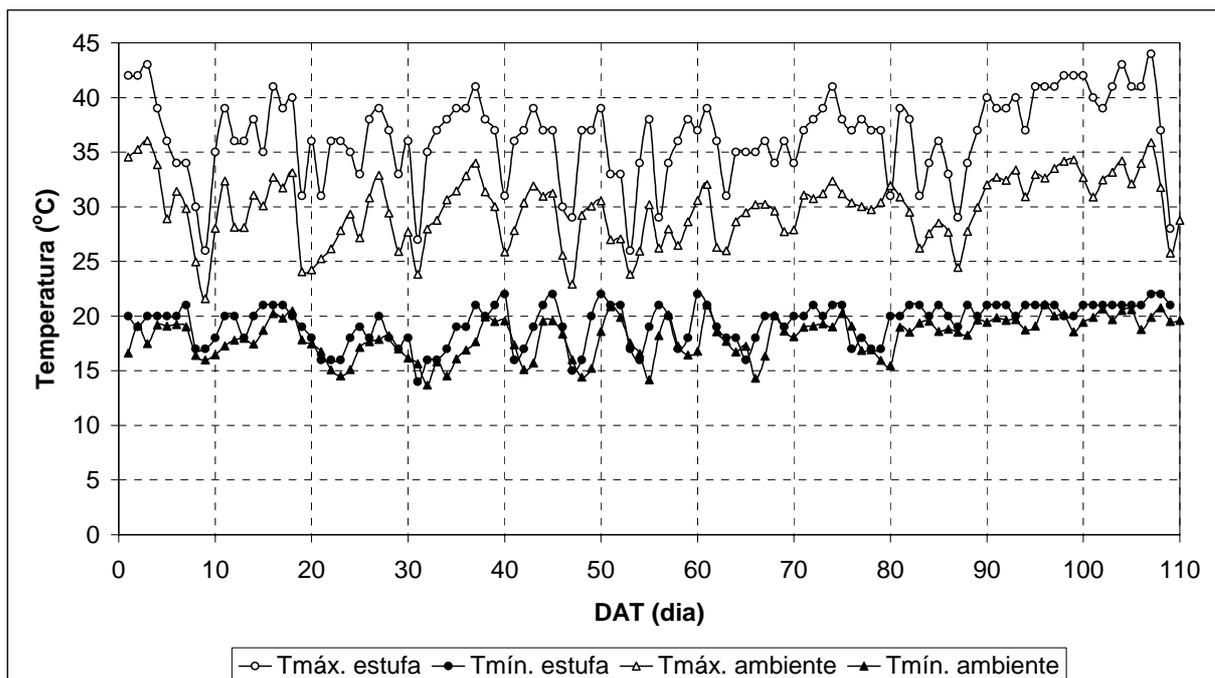


Figura 11 - Gráfico das temperaturas máxima e mínima diárias, na segunda repetição

Nota-se que a diferença observada entre os valores máximos de temperatura foi menor (cerca e 7°C) que na primeira repetição, resultado que pode ser atribuído ao uso da tela metálica. Os valores médios de temperatura mínima para o período foram de 19,4°C e 18,1°C, diferença pouco superior a 1°C. Nesta etapa, a temperatura máxima no interior da estufa ultrapassou os

35°C em 72% dos dias e a temperatura mínima foi inferior a 15°C em apenas 1 dia. Estes números indicam que as temperaturas registradas no interior da casa de vegetação neste período foram prejudiciais ao desenvolvimento da cultura. Em um estudo com a mesma cultura, em ambiente protegido e no mesmo local e período, Silva (2002) registrou temperaturas no interior da casa de vegetação variando entre 15 e 36°C. Frizzone; Gonçalves e Rezende (2001) conduziram um cultivo protegido de pimentão entre abril e setembro de 2001 e obtiveram temperaturas médias máximas e mínimas de 37°C e 11°C, respectivamente, para o município de São Manuel, Estado de São Paulo.

A Figura 12 contém os valores das temperaturas médias determinada para o ambiente interno e externo à casa de vegetação na primeira repetição do experimento. Os valores médios obtidos no interior e ambiente externo à estufa para o intervalo de 110 dias foram de 24,6°C e 18,9°C, respectivamente, uma diferença substancial de 5,7°C. Na segunda repetição os valores obtidos para o ambiente interno e externo foram de 27,9°C e 23,2°C, respectivamente, uma diferença de 4,7°C (Figura 13). Observou-se novamente que, para a segunda repetição do experimento, a diferença dos valores das temperaturas dentro e fora da estufa foi menor que a observada na primeira repetição.

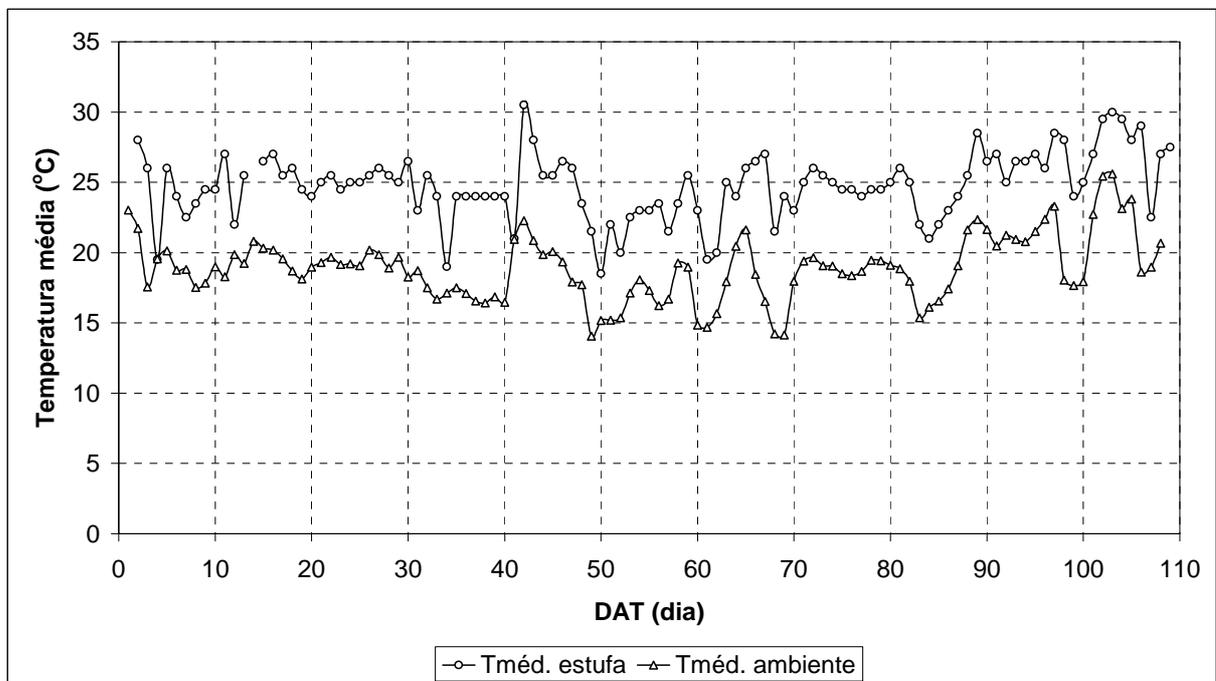


Figura 12 - Gráfico das temperaturas médias diárias, na primeira repetição

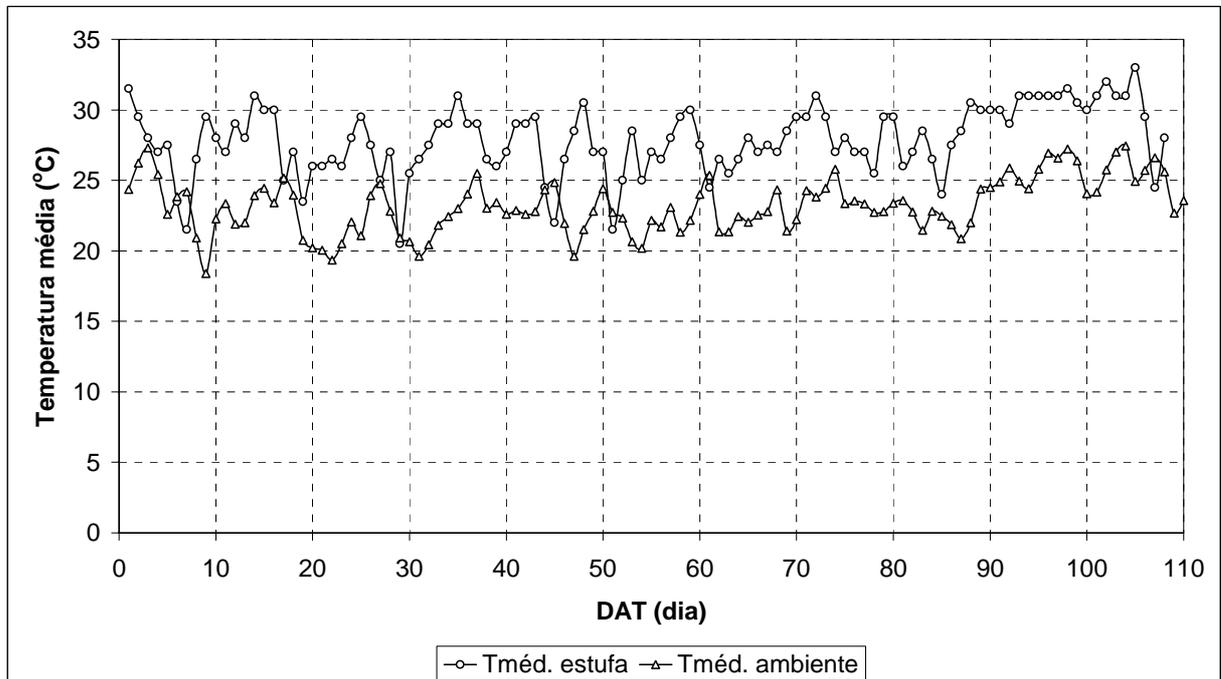


Figura 13 - Gráfico das temperaturas médias diárias, na segunda repetição

A Figura 14 ilustra a variação das umidades relativas máximas e mínimas registradas no ambiente interno e externo à casa de vegetação no primeiro ciclo de cultivo do pimentão. Observa-se que a umidade relativa máxima medida no ambiente externo à estufa foi sempre superior àquela medida em seu interior, de média 89,3%, e freqüentemente igual a 100%, com média igual a 99,7%. Com relação aos valores mínimos, observou-se a mesma tendência, ou seja, o valor da umidade relativa ambiente, de média 46,2%, foi sempre superior àquela medida dentro da casa de vegetação, que apresentou valor médio de 24,5%. Estes resultados eram esperados, uma vez que as temperaturas no interior da estufa foram sempre superiores aos valores obtidos para o ambiente externo e a umidade absoluta do ar deve ser idêntica para os dois ambientes. Frizzone; Gonçalves e Rezende (2001) obtiveram valores médios de umidade relativa máxima e mínima de 88% e 29%, respectivamente, para o mesmo período experimental em casa de vegetação no município de São Manuel, Estado de São Paulo.

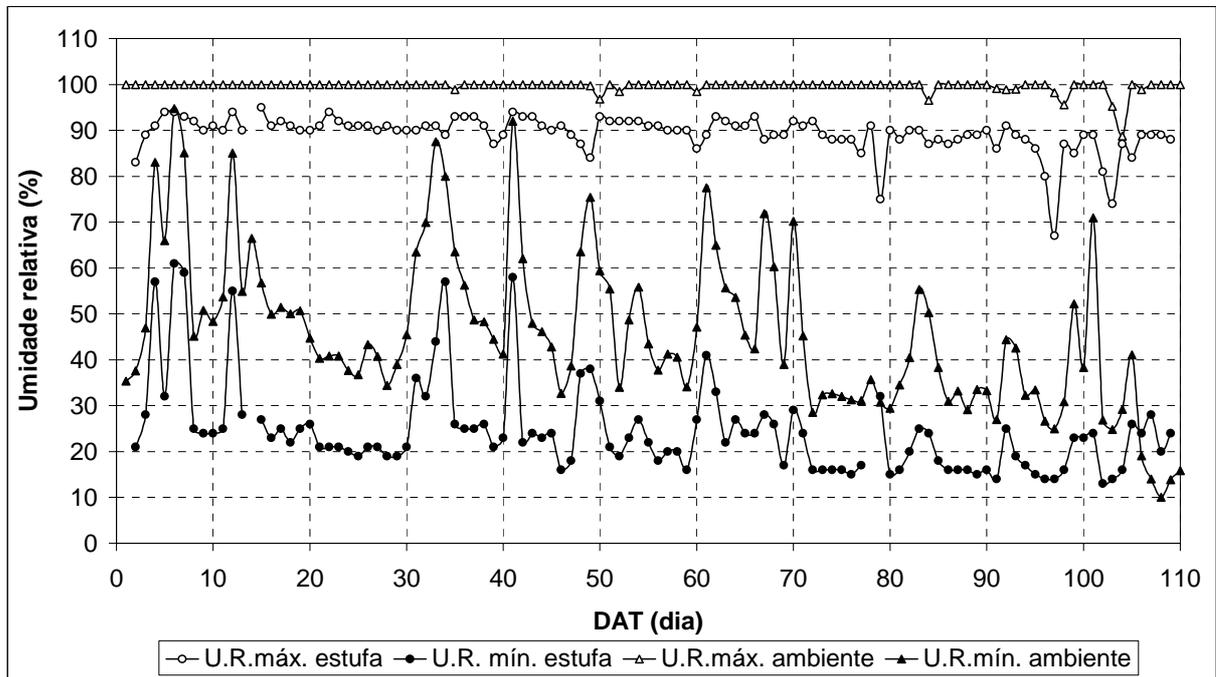


Figura 14 - Gráfico das umidades relativas máxima e mínima diárias, na primeira repetição

No período da segunda repetição os resultados observados apresentaram a mesma tendência da primeira. A média dos máximos valores de umidade relativa medidos no interior e exterior da estufa foi de 84,5% e 99,6%, respectivamente. As médias dos mínimos valores registrados foram de 31,3% e 55,6% dentro e fora da casa de vegetação (Figura 15). Observa-se que os valores de umidade relativa mínima medidos na segunda repetição desta etapa de campo foram superiores aos da primeira etapa, mesmo com maiores temperaturas. Este resultado reflete a característica climática da região de inverno seco e verão úmido.

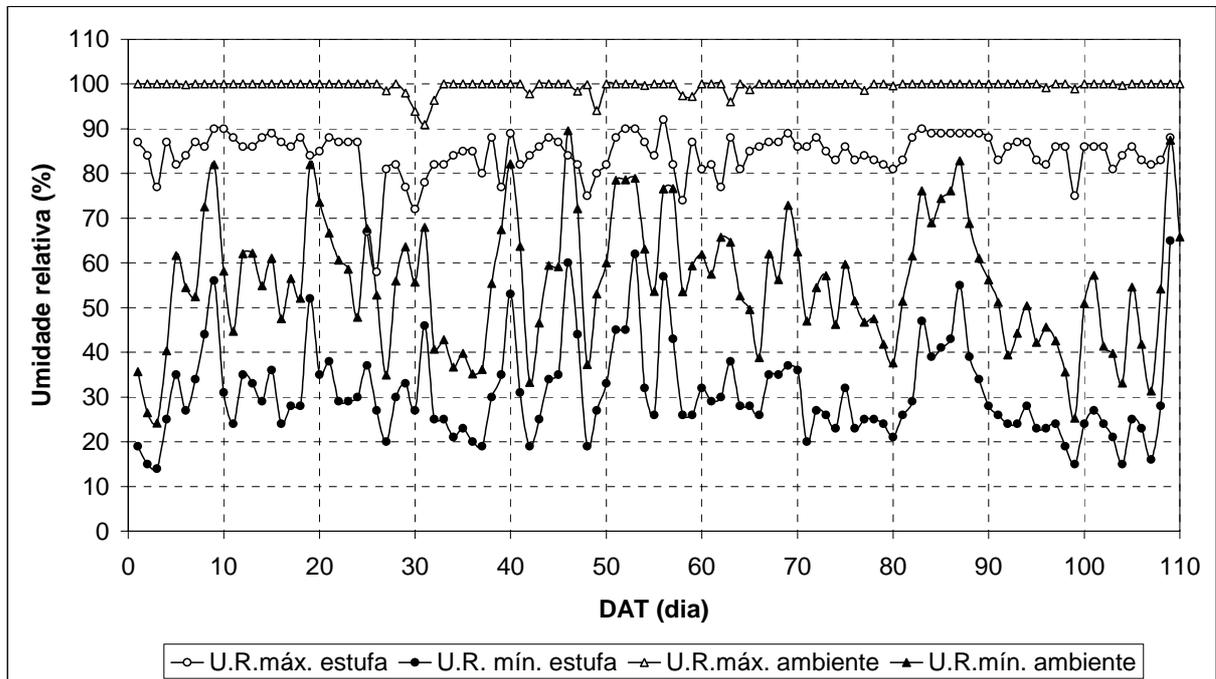


Figura 15 - Gráfico das umidades relativas máxima e mínima diárias, na segunda repetição

2.9.4.2 Análises da água e eficiência de remoção dos diversos parâmetros de qualidade analisados

As Tabelas 17 e 18 a seguir contêm os resultados das análises dos parâmetros físicos, para cada ponto de amostragem, realizadas na primeira e segunda repetição desta etapa experimental de campo.

Os valores médios de concentração de sólidos suspensos para todos os pontos de coleta, nas duas repetições do experimento, resultaram em valores inferiores a 50 mg L^{-1} , indicando haver risco baixo de entupimento de gotejadores segundo classificação proposta por Bucks e Nakayama (1986). As maiores concentrações médias na primeira repetição ocorreram para os pontos de coleta FAD e CO_2 . Na segunda repetição os maiores valores médios foram observados nos pontos AR e FAD. Os menores valores médios observados ocorreram nas amostras de água potável na primeira repetição e nas do efluente do filtro lento na segunda.

Os valores médios de turbidez indicam a presença de material coloidal em suspensão, que pode ser de origem orgânica ou material inorgânico finamente particulado (tamanho de partículas inferiores a $0,1 \mu\text{m}$). Na primeira repetição o maior valor médio foi detectado na água potável e o menor no tratamento composto por filtração lenta com desinfecção por radiação ultravioleta. Foi

observado, dentro do reservatório de água potável, o desenvolvimento de algas no período referente as segunda e terceira análises, o que explica o elevado valor médio obtido para este parâmetro. Este mesmo comportamento foi observado no segundo ciclo deste experimento, justificando novamente o maior valor médio desta etapa. A redução da turbidez da água pelo filtro lento favorece uma ação mais eficaz na desinfecção da água por radiação ultravioleta (WOJTENKO; STINSON; FILED, 2001; PIRES, 2002). O menor valor médio para a turbidez na segunda repetição ocorreu no tratamento com dióxido de carbono.

Cararo (2004), em estudo com a mesma fonte de água residuária, obteve valores de concentração de sólidos suspensos entre 14 e 35 mg L⁻¹ e para a turbidez um intervalo entre 1,5 e 4,0 NTU. Verifica-se que foram obtidos valores médios de turbidez bastante próximos destes valores para a água residuária e valores de concentração de sólidos suspensos inferiores no presente estudo. Embora esta diferença tenha sido observada, vale ressaltar que a classificação do efluente da ETE Piracicamirim foi a mesma para ambos os estudos, considerando-se a proposta de Bucks e Nakayama (1986) para este parâmetro específico. Desta forma, pode-se afirmar que não há restrição de uso deste efluente para a irrigação por gotejamento com relação a concentração de sólidos suspensos. Além disso, em estudos relacionados à qualidade de água verificam-se altos valores de variabilidade dos dados, conforme pode ser notado pelos valores dos coeficientes de variação apresentados nas Tabelas 17 e 18.

Em relação à remoção média dos dois parâmetros físicos analisados, na primeira repetição experimental verificou-se que a filtração lenta e o tratamento com filtro lento e desinfecção por radiação ultravioleta foram aqueles que apresentaram maior eficiência de remoção tanto de sólidos em suspensão, quanto de turbidez da água.

Tabela 17 - Resultados de concentração de sólidos suspensos e turbidez da água na primeira repetição do experimento (N = 4)

Ponto de coleta	Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,0 – 7,0	0,0 – 2,0	0,0 – 4,0	0,0 – 7,2	2,0 – 5,0	0,0 – 3,4
Média	2,6 B	0,5 B	2,2 B	2,8 B	3,2 B	1,4 B
Desv. Pad.	3,1	0,97	2,0	3,1	1,5	1,7
C.V. (%)	119,0	176,6	91,0	110,0	45,9	123,0
Remoção (%)	-	-	17,3	-7,7	-21,2	48,1
Ponto de coleta	Turbidez (NTU)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	1,24 – 3,14	0,25 – 11,9	0,50 – 1,91	0,42 – 6,42	0,45 – 1,77	0,47 – 090
Média	2,06	5,66	0,94	2,05	0,84	0,62
Desv. Pad.	0,79	6,19	0,67	2,92	0,63	0,19
C.V. (%)	38,6	109,4	71,3	142,8	75,0	30,6
Remoção (%)	-	-	54,5	0,5	59,4	69,7

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Bucks e Nakayma (1986): baixo (B); médio (M) e alto (A).

Segundo Di Bernardo (1993), filtros lentos que operam com taxa de filtração de 4,8 m³ m⁻² dia⁻¹ podem reduzir a turbidez da água para valores inferiores a 1,0 NTU. Em ensaios de filtros lentos com taxa de filtração de 6,0 m³ m⁻² dia⁻¹, Londe e Paterniani (2003) verificaram remoção média de 72% para turbidez e 67% para sólidos suspensos. Embora a remoção de turbidez pelo filtro lento tenha sido próxima ao valor citado (54,5%), a remoção média de sólidos suspensos foi de apenas 17,3%. Já na segunda repetição experimental, as remoções médias para o efluente da filtração lenta foram de 90,2% para a concentração de sólidos suspensos e de 81,8% para a turbidez da água. Resultados semelhantes foram obtidos por Parteniani e Conceição (2004) quando foram verificadas remoções médias da turbidez acima de 90% para filtro lento operando em regime intermitente e com taxa de filtração de 4,0 m³ m⁻² dia⁻¹. Destacaram-se também os tratamentos com dióxido de carbono e radiação ultravioleta com remoções superiores à 80% para os dois parâmetros físicos analisados. O tratamento com filtros de areia e disco apresentou os resultados menos satisfatórios com relação à retenção de sólidos suspensos e remoção da turbidez da água para as duas repetições do experimento.

Tabela 18 - Resultados de concentração de sólidos suspensos e turbidez da água na segunda repetição do experimento (N = 8)

Ponto de coleta	Sólidos Suspensos (mg L ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,20 – 38,7	0,0 – 5,2	0,0 – 3,2	0,0 – 12,4	0,0 – 2,8	0,4 – 4,2
Média	7,7 B	2,0 B	0,8 B	3,0 B	0,9 B	1,5 B
Desv. Pad.	13,1	2,3	1,1	4,0	1,0	1,2
C.V. (%)	170,5	111,7	149,3	134,6	100,5	83,1
Remoção (%)	-	-	90,2	61,2	87,6	80,4
Ponto de coleta	Turbidez (NTU)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,91 – 14,2	0,32 – 26,9	0,30 – 2,11	0,53 – 16,2	0,30 – 0,97	0,40 – 1,42
Média	5,44	8,04	0,99	4,66	0,58	0,75
Desv. Pad.	5,11	11,74	0,62	5,85	0,26	0,34
C.V. (%)	93,9	145,9	62,3	125,5	45,3	45,9
Remoção (%)	-	-	81,8	14,4	89,3	86,3

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Bucks e Nakayma (1986): baixo (B); médio (M) e alto (A).

Embora em alguns casos tenha-se observado uma elevação dos valores da concentração de sólidos suspensos ou da turbidez da água após uma etapa de tratamento, nota-se que as variações são muito baixas, de forma que a ordem de grandeza das medidas registradas é a mesma além de manter os padrões de qualidade no mesmo patamar. Airoidi (2003) observou elevação freqüente dos valores de turbidez e sólidos suspensos da água após filtração rápida. Este comportamento foi associado ao fenômeno de transpasse das partículas pelo meio filtrante após um período de retenção contínua dos sólidos em suspensão. Cararo (2004) e Puig-Bargués et al. (2005) justificam o mesmo comportamento verificado em seus estudos pela fragmentação dos sólidos suspensos durante as retrolavagens dos filtros ou durante a filtração da água pela ação abrasiva da areia. Puig-Bargués et al. (2005) concluiu em seu trabalho de campo com água residuária de tratamento secundário com uso de filtros de disco e tela, que a ação da filtração da água não resultou em mudanças significativas em sua composição. Para Capra e Scicolone (2006), filtros de areia são particularmente eficientes para águas com altas concentrações de sólidos suspensos, o que não ocorria no efluente utilizado nesta pesquisa.

As Tabelas 19 e 20 a seguir resumem os resultados dos parâmetros químicos analisados nas duas repetições experimentais.

Os resultados da Tabela 19 demonstram que o pH médio obtido no primeiro ciclo de produção do pimentão foi ligeiramente básico para pontos de coleta AR, FL e UV. Os demais pontos AP, FAD e o CO₂ apresentaram pH ácido. Nota-se que o gás carbônico contribuiu para reduzir substancialmente o pH da água, de forma que o valor médio medido em 6 análises foi de 5,16. Segundo Bucks e Nakayama (1986), valores de pH inferiores a 7,0 representam risco baixo de entupimento de gotejadores, enquanto que valores entre 7,0 e 8,0 indicam um risco médio. O tratamento com injeção de dióxido de carbono apresentou redução média do pH da água residuária em 29,0% neste ciclo. Cararo (2004) obteve valores de pH para o mesmo efluente do Piracicamirim ligeiramente básico.

A condutividade elétrica da água permite avaliar indiretamente a quantidade de sólidos dissolvidos que é uma medida da concentração de íons presentes. O valor médio deste parâmetro na primeira repetição desta etapa experimental foi maior na água residuária e menor na água potável. O tratamento com filtros de areia e disco foi aquele que apresentou maior eficiência na remoção de sólidos dissolvidos, de 17,9%, os demais tratamentos e etapas de tratamento da água apresentaram valores médios de remoção inferiores a 4,0%. Os valores obtidos por Cararo (2004) para a água residuária variaram entre 0,57 e 0,62 dS m⁻¹. Segundo Ayers e Westcot (1999) não existe restrição de uso de água para a irrigação por gotejamento quando a sua condutividade elétrica é inferior a 0,7 dS m⁻¹.

A concentração de ferro total na água potável foi nula para as 3 análises realizadas na primeira repetição desta etapa experimental de campo, atingiu seu valor máximo para o ponto de coleta FAD e os pontos CO₂ e UV apresentaram valores médios de 0,03 mg L⁻¹. Segundo Bucks e Nakayama (1986), com relação a este parâmetro, o risco de entupimento de gotejadores é médio para o tratamento com filtros de areia e disco e baixo para os demais. Cararo (2004) obteve concentrações de ferro total da água entre 0,03 e 0,06 mg L⁻¹, também classificado como não restritivo para a irrigação por gotejamento. As únicas etapas de tratamento que removeram ferro total da água residuária foram as desinfecções por injeção de dióxido de carbono (66,7%) e radiação ultravioleta (58,3%), sendo que, nos demais pontos de amostragem a concentração de ferro total foi superior à medida obtida para a água residuária. Em uma das análises de ferro total

da água para pontos de coleta antes e depois de um filtro de areia, Cararo (2004) também observou a elevação no teor de ferro após o tratamento da água.

Resultados semelhantes ocorreram com relação à concentração de manganês na água. Somente o tratamento com filtros de areia e disco apresentou concentração relacionada a um risco médio de entupimento. Para este parâmetro a água residuária apresentou o menor valor médio. Nenhum tratamento apresentou capacidade de remoção deste elemento, apesar de as concentrações terem sido mantidas em níveis desejados em todos os pontos de amostragem, exceto após a passagem da água pelos filtros de areia e disco. Embora não tenha observado elevações nos valores da concentração de manganês na água após a passagem pelo filtro de areia, no estudo de Cararo (2004) não houve qualquer remoção deste elemento. Os valores medidos na água residuária situaram-se entre 0,02 e 0,06 mg L⁻¹. Estes resultados são opostos à afirmação de Di Bernardo (1993) de que a filtração lenta pode remover ferro e manganês quase em sua totalidade.

Na segunda repetição do experimento o pH das amostras apresentou um comportamento similar ao observado na primeira. Os pontos que apresentaram pH acima de 7,0 incluíram, além dos pontos verificados anteriormente, o FAD. O tratamento com injeção de dióxido de carbono apresentou o menor valor de pH, em média 24,2% inferior ao da água residuária utilizada na irrigação.

Em relação à condutividade elétrica da água, nesta fase, os valores médios obtidos para todos os tratamentos foram superiores aqueles observados na primeira repetição. Esta elevação de sais dissolvidos na água pode ser explicada pelo aumento natural da temperatura ambiente, refletindo-se na temperatura interior dos reservatórios. No entanto, os valores permaneceram em um intervalo que assegura o uso deste efluente para o uso em irrigação por gotejamento, segundo Ayers e Westcot (1999). Novamente, o valor médio deste parâmetro foi maior na água residuária e menor na água potável. O tratamento com filtros de areia e disco apresentou maior eficiência na remoção de sólidos dissolvidos, de 10,2%, sendo que nos demais tratamentos a remoção média foi sempre inferior a 5,0%.

Tabela 19 - Resultados de pH (N = 6), condutividade elétrica (N = 6), e concentrações de ferro total (N = 3) e manganês total (N = 3) da água na primeira repetição do experimento

Ponto de coleta	pH					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	6,91 – 8,00	6,14 – 6,90	6,57 – 7,80	6,18 – 7,60	4,80 – 5,70	6,40 – 7,80
Média	7,26 M	6,41 B	7,05 M	6,73 B	5,16 B	7,05 M
Desv. Pad.	0,39	0,32	0,49	0,60	0,36	0,55
C.V. (%)	5,4	4,9	7,0	8,9	6,9	7,8
Remoção (%)	-	-	2,9	7,4	29,0	3,0
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,41 – 0,73	0,28 – 0,46	0,40 – 0,68	0,36 – 0,68	0,43 – 0,69	0,42 – 0,70
Média	0,57 B	0,36 B	0,55 B	0,47 B	0,55 B	0,55 B
Desv. Pad.	0,13	0,07	0,12	0,12	0,11	0,11
C.V. (%)	23,2	20,3	22,0	26,6	20,7	20,5
Remoção (%)	-	-	3,8	17,9	2,3	2,4
Concentração de ferro total (mg L ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,00 – 0,14	0,00 – 0,00	0,00 – 0,30	0,14 – 0,70	0,00 – 0,08	0,00 – 0,10
Média	0,08 B	0,00 B	0,10 B	0,41 M	0,03 B	0,03 B
Desv. Pad.	0,07	0,00	0,17	0,28	0,05	0,06
C.V. (%)	90,1	-	173,2	67,8	173,2	173,2
Remoção (%)	-	-	-25,0	-416,7	66,7	58,3
Concentração de manganês total (mg L ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,00 – 0,06	0,06 – 0,07	0,02 – 0,10	0,11 – 1,10	0,01 – 0,10	0,01 – 0,10
Média	0,02 B	0,07 B	0,05 B	0,45 M	0,05 B	0,05 B
Desv. Pad.	0,03	0,01	0,04	0,57	0,05	0,05
C.V. (%)	173,2	10,9	78,1	126,7	91,7	101,3
Remoção (%)	-	-	-166,7	-2133,3	-150,0	-133,3

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Bucks e Nakayma (1986) e Ayers e Westcot (1999): baixo (B); médio (M) e alto (A).

Tabela 20 - Resultados de pH (N = 8), condutividade elétrica (N = 8), e concentrações de ferro total (N = 4) e manganês total (N = 4) da água na segunda repetição do experimento

Ponto de coleta	pH					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	7,16 – 7,54	6,62 – 7,00	7,20 – 7,49	6,59 – 7,52	5,17 – 6,04	7,12 – 7,49
Média	7,40 M	6,87 B	7,42 M	7,16 M	5,61 B	7,32 M
Desv. Pad.	0,13	0,13	0,10	0,33	0,27	0,15
C.V. (%)	1,8	1,9	1,3	4,6	4,8	2,0
Remoção (%)	-	-	-0,3	3,3	24,2	1,1
Condutividade elétrica (dS m ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,48 – 0,67	0,38 – 0,44	0,45 – 0,63	0,40 – 0,65	0,43 – 0,66	0,43 – 0,63
Média	0,60 B	0,40 B	0,57 B	0,54 B	0,58 B	0,57 B
Desv. Pad.	0,07	0,02	0,07	0,08	0,08	0,07
C.V. (%)	11,8	5,9	11,6	14,9	13,1	12,2
Remoção (%)	-	-	4,9	10,2	3,4	4,9
Concentração de ferro total (mg L ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,20 – 0,50	0,10 – 1,60	0,30 – 1,10	0,06 – 0,50	0,10 – 0,50	0,00 – 0,40
Média	0,37 M	0,58 M	0,58 M	0,22 M	0,21 M	0,17 B
Desv. Pad.	0,12	0,71	0,38	0,20	0,20	0,17
C.V. (%)	34,18	123,28	64,95	92,52	94,22	100,06
Remoção (%)	-	-	-58,2	41,1	43,2	53,4
Concentração de manganês total (mg L ⁻¹)						
Ponto de coleta	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,06 – 0,14	0,00 – 0,09	0,03 – 0,13	0,08 – 0,45	0,06 – 0,15	0,05 – 0,15
Média	0,11 M	0,05 B	0,09 B	0,23 M	0,10 M	0,09 B
Desv. Pad.	0,04	0,05	0,04	0,16	0,04	0,04
C.V. (%)	32,35	115,47	48,51	69,11	37,42	45,33
Remoção (%)	-	-	22,7	-109,1	9,1	15,9

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Bucks e Nakayma (1986) e Ayers e Westcot (1999): baixo (B); médio (M) e alto (A).

Os resultados das análises de concentração de ferro total na água apresentaram valores muito superiores àqueles verificados na primeira repetição do experimento, excesso no tratamento com filtros de areia e disco. Desta forma, segundo Bucks e Nakayama (1986), todos os tratamentos apresentaram risco potencial médio de entupimento dos gotejadores, exceto pelo tratamento com radiação ultravioleta que apresentou um valor médio inferior a 0,20 mg L⁻¹. No

efluente do tratamento de filtração lenta da água, nas duas fases desta etapa experimental, obtiveram-se valores médios superiores ao da água residuária. Desta forma, infere-se que poderia haver uma contribuição de ferro na passagem da água pelo filtro lento devido à presença de algum componente metálico em sua composição ou pela presença de compostos de ferro na areia do meio filtrante. Na saída de água da caixa de entrada que mantinha o nível constante para alimentação do filtro lento havia um registro com presença de ferrugem. Segundo Madeira (2003) os elementos ferro e manganês são constituintes naturais do solo e das rochas. O primeiro é encontrado nos minerais de silicatos de rochas ígneas sob a forma de diversos óxidos (magnetita, hematita e limonita), já o segundo pode ser encontrado em maiores proporções nas rochas metamórficas e sedimentares, sendo os dióxidos de manganês mais comuns a manganita e a pirolisita. Apesar do elevado teor de ferro no efluente deste componente, houve remoção do elemento após os tratamentos subseqüentes de radiação ultravioleta e dióxido de carbono. Desta forma, supõe-se que possa ter havido, nestes tratamentos, oxidação e posterior precipitação do elemento ferro. As tecnologias tradicionais de tratamento de água potável, incluindo a filtração e desinfecção, muitas vezes não são eficientes na remoção de traços de metais solúveis em água. O processo mais efetivo para remoção de compostos de ferro e manganês é a oxidação com posterior filtração (MADEIRA, 2003).

Se na primeira repetição experimental os valores obtidos para a concentração de manganês na água foram maiores ao da água residuária para os demais tratamentos, nesta etapa houve remoção média de 22,7% deste elemento na filtração lenta da água. Observou-se, no entanto, que as amostras do efluente dos filtros de areia e disco apresentaram novamente valores superiores às da água residuária. Supõe-se que o filtro de areia poderia contribuir com a elevação do teor de manganês na água, uma vez que este fenômeno foi observado nas duas fases para o filtro rápido e na primeira para o filtro lento. Com relação ao risco potencial de entupimento, os valores médios obtidos para a água residuária, tratamentos com filtração em areia e disco e com injeção de dióxido de carbono podem ser classificados como médios, ao passo que os demais se encontram na faixa de baixo risco potencial (BUCKS; NAKAYAMA, 1986).

Os parâmetros biológicos analisados nas amostras de água foram *E. coli* e demanda bioquímica de oxigênio (DBO₅). A concentração mínima de *E. coli* ocorreu na água potável que deve, por legislação própria, apresentar ausência destas bactérias (Tabelas 21 e 22).

Tabela 21 - Resultados de concentração de *E. coli* (N = 3) e demanda biológica de oxigênio (N = 4) da água na primeira repetição do experimento

Ponto de coleta	<i>E. coli</i> (NMP 100mL ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	133 – 960	< 1	77 - 1011	111 - 2420	88 - 268	< 1 - 71
Média geométrica	297	< 1	339	459	131	4
Remoção (%)	-	-	-14,3	-54,8	55,9	98,6
Ponto de coleta	DBO ₅ (mg L ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	1,1 – 10,2	1,6 – 7,6	2,0 – 29,4	9,0 – 16,3	6,4 – 16,0	2,2 – 10,0
Média	7,3 B	4,0 B	19,7 M	12,7 B	11,4 B	5,7 B
Desv. Pad.	4,3	2,6	12,3	3,9	4,4	3,3
C.V. (%)	58,6	65,9	62,2	30,5	38,7	58,6
Remoção (%)	-	-	-169,3	-73,6	-55,2	22,4

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Capra e Scicolone (2004): baixo (B); médio (M) e alto (A).

A radiação ultravioleta apresentou valor de média geométrica de 4 NMP (100mL)⁻¹, valor muito inferior às médias obtidas nos demais tratamentos da água residuária na primeira repetição do experimento. Verificou-se que houve remoção expressiva de *E. coli* após a passagem da água pelos dois tratamentos complementares à filtração lenta, sendo mais eficiente o uso da radiação ultravioleta que alcançou uma remoção média de 98,6%. O filtro lento e o tratamento com filtros de areia e disco não foram eficientes na remoção deste parâmetro, possivelmente deve ter havido a formação de um meio de cultura nos seus elementos filtrantes, favorável ao desenvolvimento das bactérias. Puig-Bargués et al. (2005) verificaram acréscimo em medidas de turbidez e Demanda Química de Oxigênio – DQO (fortemente correlacionada a DBO) em efluentes dos filtros de irrigação com água residuária. A elevação dos valores de DQO foi atribuída ao crescimento de microorganismos nos elementos filtrantes. Embora o resultado apresentado pelo filtro lento tenha sido aquém do esperado, a literatura cita que este método remove mais de 90% de bactérias entéricas (DI BERNARDO, 1993). Londe e Paterniani (2003), para filtros lentos com taxa de filtração de 6,0 m³ m⁻² dia⁻¹, obtiveram eficiência de remoção de 83,87% e Paterniani e Conceição (2004) obtiveram remoção superior a 90% para uma taxa de filtração de 4,0 m³ m⁻² dia⁻¹. O resultado negativo de eficiência do filtro lento pode ser atribuído

principalmente à última análise, que foi realizada com 85 dias após o início da carreira de filtração, quando o valor medido foi de $1011 \text{ NMP}(100\text{mL})^{-1}$. A única limpeza necessária do filtro lento nesta primeira fase ocorreu 3 dias antes desta amostragem e, portanto, não houve tempo suficiente para maturação do filme biológico (*schmutzdecke*) de forma que a atividade biológica do filtro lento não proporcionou tratamento eficaz da água. Soma-se a isso o fato de terem sido realizadas apenas 3 análises neste período, em virtude de limitações do laboratório de análises de água do departamento que estava sendo implantado.

Com relação a DBO_5 , na mesma fase, verificou-se que apenas a desinfecção por radiação ultravioleta foi capaz de promover a redução do valor deste parâmetro, em 22,5%. As mesmas considerações com relação ao desempenho do filtro lento na remoção de *E. coli* da água residuária podem ser estendidas para análise de DBO_5 . Desta forma, segundo Capra e Scicolone (2004), em relação ao risco de entupimento de gotejadores, o resultado médio obtido para o efluente do filtro lento podem ser classificado como médio. No entanto, os tratamentos complementares à filtração lenta da água residuária reduziram a DBO_5 para valores médios inferiores a 15 mg L^{-1} , o que significa que todas as unidades de irrigação foram abastecidas com águas que apresentam risco baixo de entupimento para os gotejadores, considerando-se apenas este parâmetro.

Na segunda repetição experimental as análises da água potável e do tratamento com exposição à radiação ultravioleta apresentaram, para as 8 amostragens realizadas no período, resultados inferiores ao nível de detecção do método. Desta forma, admite-se que a média geométrica destes tratamentos foi inferior à unidade e que a eficiência de remoção do tratamento com radiação ultravioleta foi de 100%. Trabalhando em bateladas e com água sintética, Aguiar et al. (2002) obteve inativação completa de *E. coli* para tempos de exposição de 3 e 5 minutos em um reator ultravioleta de 100 mm de diâmetro com lâmpada de 15 W. No mesmo experimento, quando a água foi exposta a um tempo de um minuto o grau médio de inativação obtido variou na escala logaritma de base 10 entre 3 e 4. Na presente pesquisa a lâmpada do reator tinha potência duas vezes maior (30 W) e o tempo estimado de exposição da água, em fluxo contínuo, foi de 90 segundos. Mesmo não se tendo uma estimativa da dosagem de radiação aplicada ao efluente no tratamento em questão, pode-se estabelecer uma comparação razoável entre os dois experimentos com base na ordem de grandeza dos tempos de exposição. Se a relação entre potência da lâmpada e a dose de radiação uv aplicada for linear, pode-se estabelecer que neste experimento se fosse

utilizada uma lâmpada de 15 W o tempo requerido para se obter a mesma dosagem seria de 180 segundos, ou seja, os mesmos 3 minutos do experimento de Aguiar et al. (2002) que obteve 100% de inativação dos microorganismos. Elevados valores de remoção média também foram obtidos pelos demais tratamentos, especialmente o tratamento com injeção de dióxido de carbono (97,5%) e o filtro lento (93,5%). Esse último resultado é semelhante ao obtido por Paterniani e Conceição (2004). Os resultados indicam que o desempenho da filtração lenta foi mais eficaz que aquela verificada na primeira repetição do experimento, atendendo ao nível esperado de remoção segundo Di Bernardo (1993). Apesar de em algumas análises o valor medido para a água residuária tenha ultrapassado o limite recomendado pela OMS (WHO, 1989) para irrigação irrestrita, os valores médios obtidos nas duas repetições foram inferiores a 1.000 NMP (100 mL)⁻¹.

Cabe destacar que para a fonte de água potável não foi detectada a presença de *E. coli* em nenhuma das amostragens das duas repetições experimentais. Além disso, o fato de não ter sido detectada presença de bactérias do grupo coliforme na água de irrigação que abasteceu a parcela que dispunha do tratamento de filtração lenta seguida pela radiação ultravioleta, não significa que o efluente, que teve origem nos esgotos domésticos tratados, esteja isenta de outros microorganismos patogênicos, apresentando segurança aos trabalhadores agrícolas e possa ser utilizado na irrigação de produtos a serem consumidos crus.

Em relação aos resultados da DBO₅ da segunda fase, verificou que, somente os dois tratamentos que incluíram uma etapa posterior à filtração da água obtiveram eficiência de remoção média positiva deste parâmetro. O melhor desempenho foi observado para a radiação ultravioleta (50,1%), seguida pela injeção de dióxido de carbono (24,5%). Os valores médios obtidos para todos os pontos de coleta estão associados a um risco classificados baixo de entupimento de gotejadores, segundo Capra e Scicolone (2004). Cararo (2004) encontrou valores de DBO₅ para o efluente da ETE Piracicamirim variando entre 11 e 27 mg L⁻¹, pouco acima dos medidos neste experimento. Além disso, em sua pesquisa, o filtro de areia proporcionou remoções médias de DBO₅ de 25%.

Tabela 22 - Resultados de concentração de *E. coli* (N = 8) e demanda biológica de oxigênio (N = 4) da água na segunda repetição do experimento

Ponto de coleta	<i>E. coli</i> (NMP 100mL ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	25 - 2496	< 1	1 - 411	2 - 1418	1 - 365	< 1
Média geométrica	420	< 1	27	57	11	< 1
Remoção (%)	-	-	93,5	86,4	97,5	100
Ponto de coleta	DBO ₅ (mg L ⁻¹)					
	AR	AP	FL	FAD	CO ₂	UV
Variação	0,9 – 11,8	0,0 – 4,2	0,3 – 23,9	3,9 – 11,5	0,2 – 12,5	0,9 – 6,8
Média	6,1 B	1,1 B	9,7 B	8,5 B	4,6 B	3,0 B
Desv. Pad.	4,7	1,8	9,2	2,9	4,8	2,3
C.V. (%)	77,2	153,5	95,1	33,9	105,5	76,3
Remoção (%)	-	-	-60,6	-40,1	24,5	50,1

Legenda: AR – água residuária; AP – água potável; FL – efluente do filtro lento; FAD – efluente dos filtros de areia e disco; CO₂ – efluente do ponto de injeção de dióxido de carbono; UV – efluente do reator ultravioleta.

Nota: As letras que aparecem após os valores médios das análises referem-se à classificação proposta por Capra e Scicolone (2004): baixo (B); médio (M) e alto (A).

De maneira geral pode-se afirmar que a qualidade das águas utilizadas na irrigação da cultura do pimentão apresentou baixo risco de entupimento aos gotejadores nas duas fases desta etapa experimental de campo para quase todos os parâmetros de qualidade avaliados. Os melhores desempenhos dos sistemas de tratamento da água ocorreram na remoção dos parâmetros físicos estudados. Destacaram-se, nesse sentido, a filtração lenta e a desinfecção por radiação ultravioleta na primeira fase e os mesmos tratamentos acrescidos da injeção de dióxido de carbono. Houve problema de contaminação de ferro e manganês da água tanto no filtro lento, quanto no filtro de areia associado ao de disco. Com relação aos parâmetros biológicos analisados, verificou-se expressiva melhora no desempenho dos tratamentos com radiação ultravioleta, injeção de dióxido de carbono e do filtro lento e na segunda etapa do experimento, possivelmente associada às temperaturas ambientes mais elevadas inerentes à época de sua realização. Resultados excepcionais foram obtidos na desinfecção da água com emprego do reator ultravioleta. Os resultados de DBO₅ das análises do filtro lento resultaram, para as duas fases, em valores superiores aos obtidos para a água residuária do experimento. Isto pode ser explicado pela formação da camada biológica na superfície do elemento filtrante e da baixa taxa de filtração empregada. Estudos posteriores devem considerar a possibilidade da construção de

um pré-filtro dinâmico anterior ao filtro lento com a finalidade de garantir a este um afluente de melhor qualidade e com suas características mais estáveis. Paterniani e Conceição (2004) e Tangerino e Di Bernardo (2005) recomendam fortemente o uso de pré-filtros dinâmicos de fluxo ascendente como pré-tratamento à filtração lenta, mantendo as vantagens de baixos custos de implantação, manutenção e operação do sistema. Segundo Hespanhol (2003) é extremamente benéfico que os efluentes tratados contenham concentrações significativas de matéria orgânica. No entanto, o equilíbrio entre o limite de valores de DBO benéficos às culturas irrigadas, mas prejudiciais aos sistemas de irrigação por gotejamento, deve ser determinado em estudos complementares.

Embora a qualidade da água residuária utilizada no experimento tenha sido surpreendentemente elevada, há que se considerar que a mesma era repostada em média, a cada 7 dias, tendo tempo suficiente para sofrer processos físicos (sedimentação) e biológicos durante o período. Capra e Scicolone (2006) obtiveram efluente de alta qualidade, com valores médios de pH igual a 7,5, concentração de sólidos suspensos totais de $3,0 \text{ mg L}^{-1}$, condutividade elétrica de $1,5 \text{ dS m}^{-1}$ e DBO_5 igual a 15 mg L^{-1} , após submeter o efluente de tratamento secundário de uma ETE à diluição com água limpa (razão de 1:1) com posterior sedimentação. O armazenamento e o tempo de detenção hidráulico, talvez, sejam fatores imprescindíveis para haver viabilidade técnica do uso da água residuária como fonte alternativa de água na irrigação.

2.9.5 Uniformidade de distribuição de água às plantas

As tabelas a seguir contêm os dados obtidos nos ensaios de vazão realizados nas duas repetições experimentais de campo, para os 4 tratamentos de água e os dois tipos de gotejadores, labirinto (LAB) e microtubo (MIC). Na primeira repetição experimental foram realizados 7 ensaios e outros 8 ocorreram na fase seguinte.

Pela análise dos resultados apresentados nas Tabelas 23 e 24, verifica-se que as vazões médias obtidas para cada tratamento não variaram substancialmente desde o primeiro até o sétimo ensaio realizado, já que as maiores variações ocorreram para os microtubos instalados nas parcelas abastecidas pelos tratamentos de água FAD e UV. No entanto, nestas mesmas unidades de irrigação ocorreram as maiores variações da pressão de serviço, o que contribui para justificar tal comportamento, pois os microtubos são mais sensíveis às variações de pressão (expoente da curva vazão *versus* pressão “x” é mais próximo da unidade, vide Tabela 14).

Tabela 23 - Resultados de vazão para os oito tratamentos ($L h^{-1}$), na primeira repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação	1,96–2,06	1,95–2,02	1,95–2,06	1,80–2,02	2,00–2,08	2,02–2,22	2,07–2,14	2,01–2,20
Média	2,00	1,98	2,02	1,93	2,04	2,12	2,10	2,10
Desv. Pad.	0,03	0,03	0,04	0,07	0,03	0,06	0,02	0,07
C.V. (%)	1,44	1,33	1,91	3,42	1,64	2,95	1,19	3,29

Tabela 24 – Resultados de pressão de serviço para os quatro tratamentos (kPa), na primeira repetição experimental

	AP	FAD	CO ₂	UV
	Variação	105,0 – 116,0	110,0 – 122,0	122,0 – 129,0
Média	109,4	114,9	125,9	122,3
Desv. Pad.	3,4	3,7	2,5	5,0
C.V. (%)	3,11	3,24	2,02	4,11

As variações nos valores das vazões verificadas entre os 4 tratamentos de água (AP, FAD, CO₂ e UV) são decorrentes das variações nos valores de pressão de serviço em cada unidade de irrigação, muito embora todos os reguladores de pressão utilizados no experimento sejam da mesma marca e modelo. Pode-se, portanto, apenas comparar diretamente a diferença de vazão obtida entre os dois modelos de gotejadores dentro de cada tratamento de água. É notável a diferença da vazão média entre os dois tipos de gotejadores, nos tratamentos FAD e CO₂.

As Tabelas 25 e 26 a seguir contêm os dados das vazões e pressões obtidas na segunda repetição experimental.

Verifica-se que, nas duas repetições experimentais, para todos os tratamentos da água o coeficiente de variação das vazões médias dos ensaios foi sempre maior para o microtubo do que os obtidos para o gotejador do tipo labirinto. Dentro de cada tratamento as maiores diferenças de vazão entre os dois tipos de gotejadores ocorreram para o tratamento com água potável e o com injeção de dióxido de carbono. As variações de pressão registradas entre os ensaios refletiram diretamente na variação de vazão dos gotejadores do tipo microtubo, mais sensíveis a este fator. Além de os microtubos serem mais sensíveis às variações de pressão, são também sensíveis às variações de temperatura por possuírem escoamento laminar. Como na segunda repetição experimental as temperaturas foram maiores do que as registradas na primeira fase é provável

que esta grandeza física tenha atuado significativamente no desempenho dos microtubos, contribuindo decisivamente para a elevação da variabilidade dos dados de vazão.

Tabela 25 - Resultados de vazão para os oito tratamentos ($L h^{-1}$), na segunda repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação	1,97-2,01	1,75-2,05	1,98-2,06	1,86-2,14	2,05-2,10	2,07-2,26	1,97-2,09	1,86-2,18
Média	2,00	1,90	2,02	1,98	2,07	2,15	2,05	2,06
Desv. Pad.	0,01	0,12	0,03	0,11	0,02	0,07	0,04	0,11
C.V. (%)	0,60	6,38	1,64	5,77	1,00	3,28	1,77	5,34

Tabela 26 – Resultados de pressão de serviço para os quatro tratamentos (kPa), na segunda repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	Variação	101,0 – 115,8		111,8 – 122,6		114,8 – 125,6		105,9 – 121,6
Média	111,3		117,9		121,2		116,6	
Desv. Pad.	5,0		3,8		4,5		5,1	
C.V. (%)	4,52		3,20		3,70		4,41	

Os perfis da variação da vazão medida ao longo das duas fases experimentais desta etapa de campo podem ser visualizados nos gráficos das Figuras 16 e 17 a seguir.

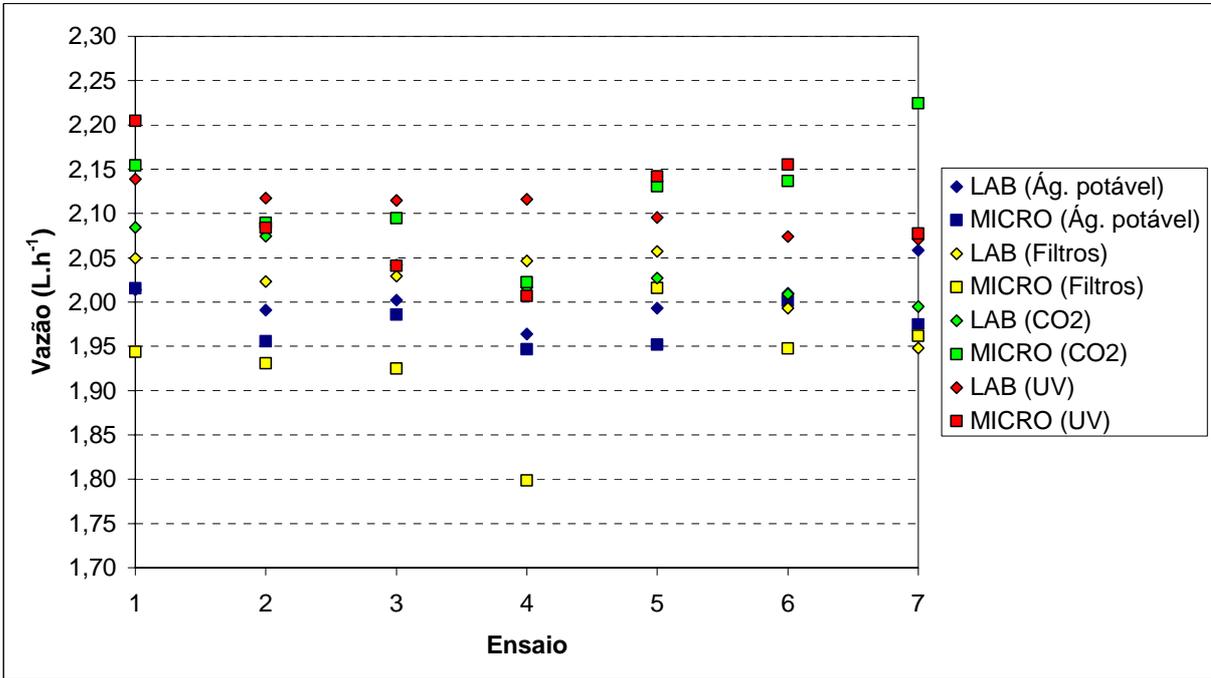


Figura 16 - Gráfico da variação da vazão média de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo

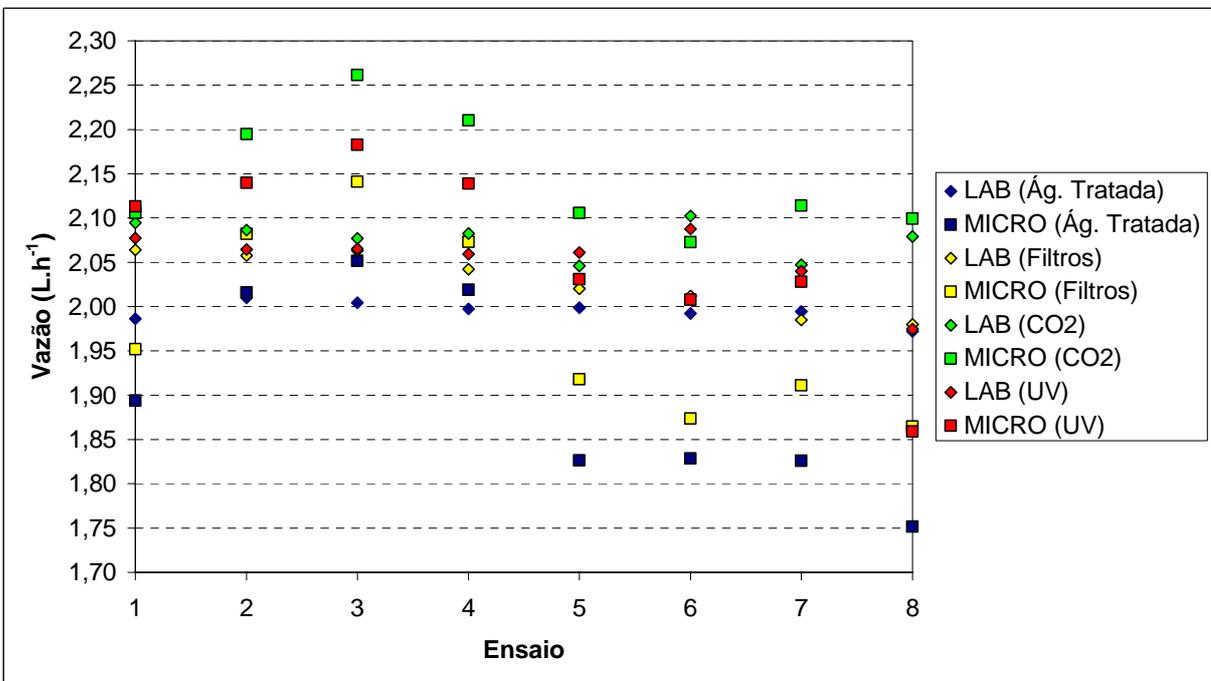


Figura 17 - Gráfico da variação da vazão média de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo

Em geral, para as duas fases realizadas, observou-se maior variabilidade dos dados obtidos para os gotejadores do tipo microtubo independentemente do tratamento. Além disso, a maior parte dos tratamentos não apresentou tendência de queda contínua da vazão ao longo do período de coleta dos dados, o que pode ser explicado principalmente pela variação da pressão de serviço verificada na entrada das parcelas de irrigação entre um ensaio e outro. Infere-se também que as variações hidráulicas advindas dos processos de entupimento dos gotejadores ocorreram com menor intensidade neste experimento, já que o tempo total de funcionamento dos sistemas de irrigação foi da ordem de 20 horas em cada repetição. Os tempos de funcionamento de cada sistema de irrigação para cada repetição experimental serão apresentados após a discussão dos resultados dos índices de uniformidade de distribuição de água às plantas.

A seguir são apresentados e discutidos os resultados do dois índices de uniformidade, calculados para as duas repetições experimentais (Tabelas 27, 28, 29 e 30).

Tabela 27 - Resultados de uniformidade estatística (Us, %) para os oito tratamentos, na primeira repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação	97,4-98,2	93,6-97,8	9,0-97,7	90,0-96,5	84,9-94,9	88,0-97,0	97,1-97,6	93,6-96,4
Média	97,9	96,1	95,3	93,8	89,4	93,3	97,3	95,2
Desv. Pad.	0,3	1,7	2,6	2,2	4,2	3,1	0,2	1,0
C.V. (%)	0,35	1,73	2,77	2,34	4,65	3,37	0,19	1,08
Classe ⁽¹⁾	E	E	E	E	B	E	E	E

⁽¹⁾ Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A), Ruim (R) e Inaceitável (I), segundo classificação proposta pela ASAE (1998).

Os resultados médios da uniformidade estatística obtidos para cada um dos 8 tratamentos sugerem que a uniformidade de distribuição de água às plantas, na primeira repetição experimental, foram excelentes para todos os tratamentos, exceto o CO₂ com gotejadores do tipo labirinto que obteve resultado médio classificado como bom, conforme classificação da ASAE (1998). Os melhores resultado foram obtidos para os tratamentos UV e AP. Como a unidade abastecida com água potável é testemunha para a análise de entupimento dos gotejadores, conclui-se que o tratamento composto pela associação da filtração lenta com desinfecção por radiação ultravioleta apresentou desempenho eficaz na prevenção de entupimento dos emissores. Embora o desempenho do filtro lento não tenha sido eficiente na remoção de bactérias *E. coli* e

matéria orgânica, as remoções de sólidos suspensos e turbidez foram as mais pronunciadas. O reator ultravioleta, por sua vez, foi o tratamento da água mais eficiente na remoção dos parâmetros biológicos analisados. Diversos pesquisadores consideram que a associação dos fatores microbiológicos e físicos, passíveis de promover entupimento dos emissores, é a principal causa da ocorrência da obstrução dos gotejadores. (ROMAN, 1999; CAPRA; SCICOLONE, 2004).

Desta forma, dos 8 tratamentos considerados, 7 obtiveram desempenhos excelentes e apenas um foi classificado como bom (contendo gotejadores do tipo labirinto).

Tabela 28 - Resultados de uniformidade estatística (Us, %) para os oito tratamentos, na segunda repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação	96,8-97,4	86,8-96,7	92,8-97,5	90,5-95,9	90,2-95,4	94,0-96,7	92,5-97,8	92,3-94,8
Média	97,2	92,6	96,1	93,7	92,7	95,0	96,9	93,7
Desv. Pad.	0,2	3,7	1,8	1,9	2,0	1,0	1,9	1,0
C.V. (%)	0,22	3,97	1,87	2,04	2,17	1,05	1,98	1,09
Classe ⁽¹⁾	E	E	E	E	E	E	E	E

⁽¹⁾ Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A), Ruim (R) e Inaceitável (I), segundo classificação proposta pela ASAE (1998).

Nesta segunda repetição experimental todos os tratamentos apresentaram desempenho considerado excelente pela classificação adotada (ASAE, 1998). Nos tratamentos AP, FAD e UV foram obtidos maiores coeficientes para os gotejadores do tipo labirinto, quando comparados aos resultantes nas parcelas irrigadas com microtubos (Tabela 28). Já para o tratamento com injeção de dióxido de carbono foi observado o inverso, as parcelas com gotejadores do tipo microtubo apresentaram maior coeficiente uniformidade, considerando-se a média dos oito ensaios realizados. Verificou-se que nesta segunda repetição nenhum dos tratamentos apresentou valor médio de uniformidade estatística inferior a 92,0%. Este resultado indica que a prevenção do entupimento pelos distintos tratamentos de água foi melhor nesta fase, concordando com a melhora de desempenho observada especialmente no filtro lento e seus dois tratamentos complementares da água.

Os maiores valores de coeficientes de uniformidade estatística, nas duas fases desta etapa experimental, foram obtidos nas parcelas com gotejadores do tipo labirinto e os tratamentos AP e

UV. Já os resultados mais baixos ocorreram na parcela com gotejadores do tipo labirinto e tratamento CO₂, indicando haver entre estes dois fatores de estudo, uma interação negativa. De fato, ao longo do período experimental e, principalmente na realização dos ensaios de vazão, observava-se que a injeção de CO₂ nas linhas laterais de irrigação não ocorria de forma contínua e uniforme, mas em pulsos. Este comportamento hidráulico afetou mais o desempenho do gotejador do tipo labirinto provavelmente devido as suas características construtivas de tortuosidade na passagem da água, pelas sucessivas e drásticas mudanças de direção. Nas porções curvas do trajeto o gás poderia estar se acumulando e dificultando a passagem da água.

Os gráficos das Figuras 18 e 19 apresentam o perfil de variabilidade dos valores de uniformidade estatística obtidos para os 7 ensaios de vazão realizados na primeira repetição experimental e para os 8 ensaios realizados na fase seguinte, respectivamente.

Verifica-se na Figura 18, especialmente, que há uma tendência crescente de queda nos valores de U_s para os gotejadores do tipo labirinto instalados no tratamento CO₂ e a pouca variabilidade dos valores obtidos para os gotejadores do tipo labirinto nos tratamentos AP e UV.

Já na segunda repetição as tendências de queda contínua dos valores de U_s são verificadas com clareza para os tratamentos AP e FAD com microtubos. Os tratamentos AP e UV com gotejadores do tipo labirinto, novamente, apresentaram os melhores resultados médios e menor variabilidade entre os ensaios realizados.

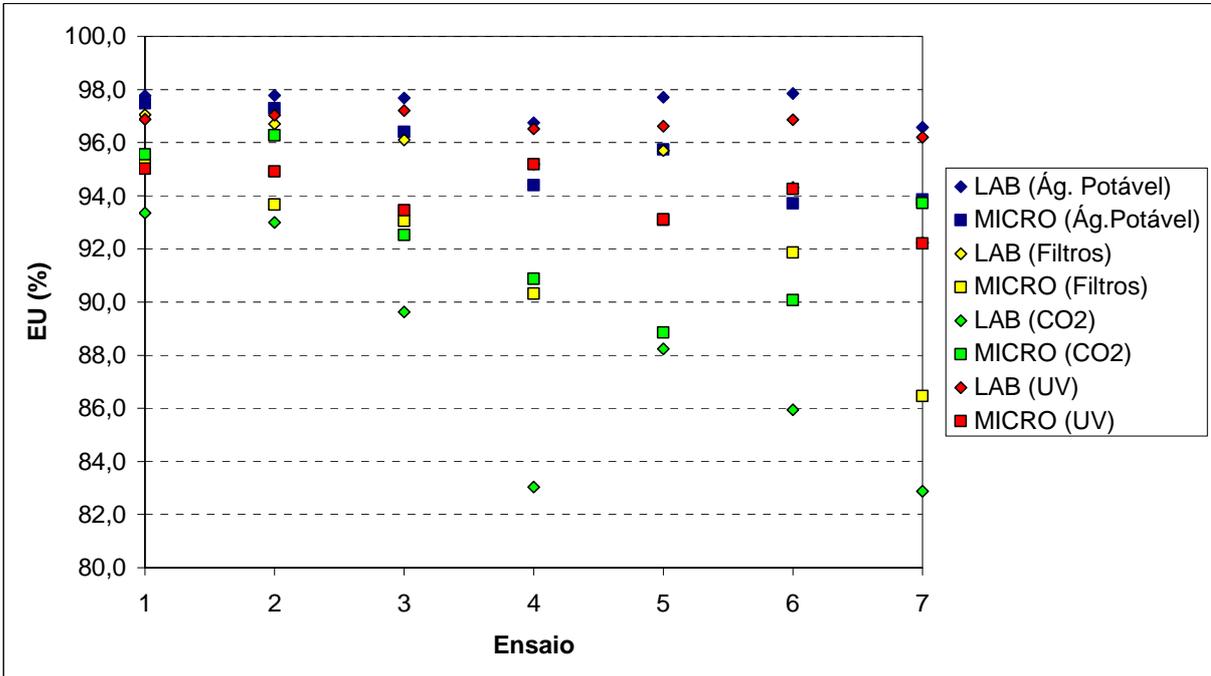


Figura 18 - Gráfico da variação da uniformidade estatística (Us) de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo

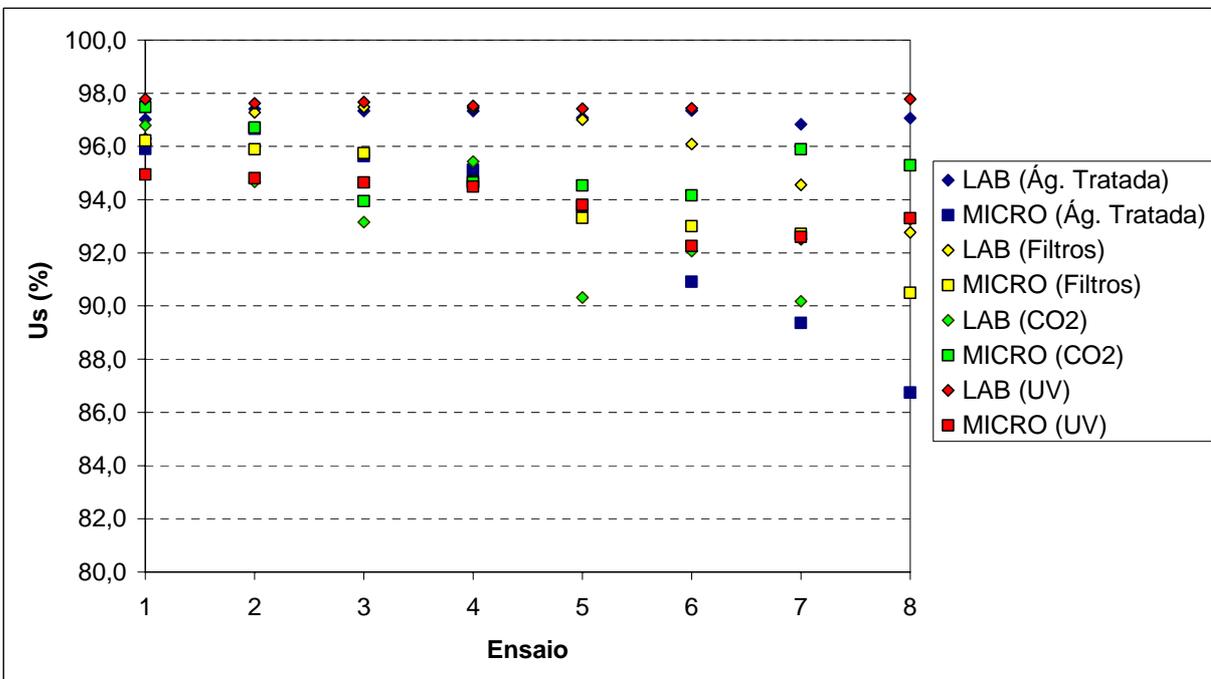


Figura 19- Gráfico da variação da uniformidade estatística (Us) de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo

As Tabelas 29 e 30 a seguir apresentam os resultados dos coeficientes de uniformidade de emissão (EU) da água obtidos em cada tratamento na primeira e segunda repetição experimental, respectivamente.

Tabela 29 - Resultados uniformidade de emissão (EU, %) para os oito tratamentos, na primeira repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação	96,6-97,8	93,7-97,5	92,2-97,1	86,5-95,3	82,9-93,4	88,9-96,3	96,2-97,2	92,2-95,2
Média	97,4	95,6	95,3	92,0	88,0	92,6	96,8	94,0
Desv. Pad.	0,5	1,6	1,7	2,9	4,3	2,8	0,3	1,1
C.V. (%)	0,55	1,66	1,73	3,13	4,90	3,02	0,35	1,20
Classe ⁽¹⁾	E	E	E	E	B	E	E	E

⁽¹⁾ Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A) e Ruim (U), segundo classificação proposta pela ASAE (1998).

Os resultados de uniformidade de emissão (EU) apresentados nas Tabelas 29 e 30 são bastante similares aos obtidos para a uniformidade estatística (U_s) nas duas repetições experimentais.

Tabela 30 - Resultados uniformidade de emissão (EU, %) para os oito tratamentos, na segunda repetição experimental

	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
Variação								
Média	96,9	89,8	95,5	92,3	93,3	94,2	96,9	91,3
Desv. Pad.	0,3	5,1	1,7	2,8	2,1	1,1	1,2	1,6
C.V. (%)	0,36	5,71	1,79	3,00	2,30	1,13	1,19	1,72
Classe ⁽¹⁾	E	B	E	E	E	E	E	E

⁽¹⁾ Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A) e Ruim (U), segundo classificação proposta pela ASAE (1998).

Os mesmos sete tratamentos que apresentaram desempenhos classificados como excelente com base nos valores médios de U_s , segundo a ASAE (1998), recebem a mesma classificação na primeira repetição experimental a partir da análise dos respectivos valores médios de EU. O mesmo é válido para o tratamento CO₂ com gotejadores do tipo labirinto que recebeu classificação boa para o coeficiente EU. A variabilidade dos dados também foi mais pronunciada nas parcelas contendo microtubos para todos os tratamentos, exceto pelos gotejadores do tipo

labirinto do tratamento CO₂. Desta forma, os valores médios da uniformidade de emissão foram sempre maiores para os gotejadores do tipo labirinto, exceto para o tratamento CO₂. A causa desta ocorrência está ligada, possivelmente, à maior sensibilidade dos microtubos às variações de pressão e ao possível estágio inicial de entupimento dos emissores. Justamente no tratamento CO₂ ocorreram as menores variações da pressão de serviço na primeira repetição e a segunda menor variação na segunda.

Já na segunda repetição experimental foram observados resultados médios excelentes para todos os tratamentos, exceto pelo tratamento AP com microtubos que obteve classificação boa, diferindo daquele obtido nesta fase segundo cálculo do coeficiente de uniformidade estatística.

O gráfico da Figura 20 mostra o perfil de variação dos valores da uniformidade de emissão obtidos para os 7 ensaios de vazão. Assim como esperado, verifica-se grande semelhança entre este e o gráfico da Figura 18. Destacam-se os resultados de uniformidade de emissão obtidos ao longo dos 7 ensaios nas parcelas com gotejadores do tipo labirinto com os tratamentos AP e UV.

No gráfico da Figura 21 observa-se clara tendência de diminuição dos valores do coeficiente de uniformidade de emissão para os tratamentos AP, FAD e UV para os microtubos e CO₂ com gotejador do tipo labirinto. Valores mais constantes e com uniformidade superior a 96% foram obtidos para a associação dos gotejadores do tipo labirinto com os tratamentos AP e UV.

Capra e Scicolone (2006) observaram variação da uniformidade de emissão (EU) para gotejadores do tipo labirinto, em parcelas de irrigação com filtro de areia e disco, entre 67 e 98% após ensaios de 60 horas com uso de efluente secundário. Neste estudo, os autores concluíram que as maiores correlações entre os parâmetros de qualidade de água analisados e o entupimento observado ocorreram para o pH, sólidos suspensos totais e DBO₅.

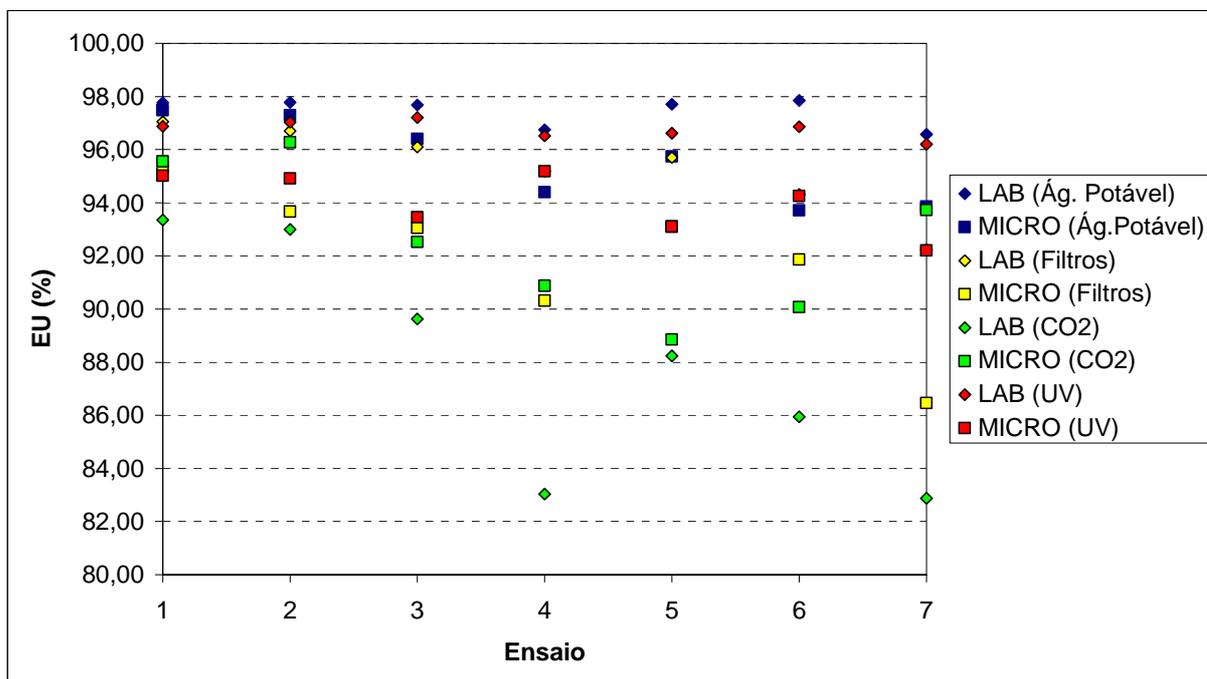


Figura 20 - Gráfico da variação da uniformidade de emissão (EU) de cada tratamento para a primeira repetição experimental de campo

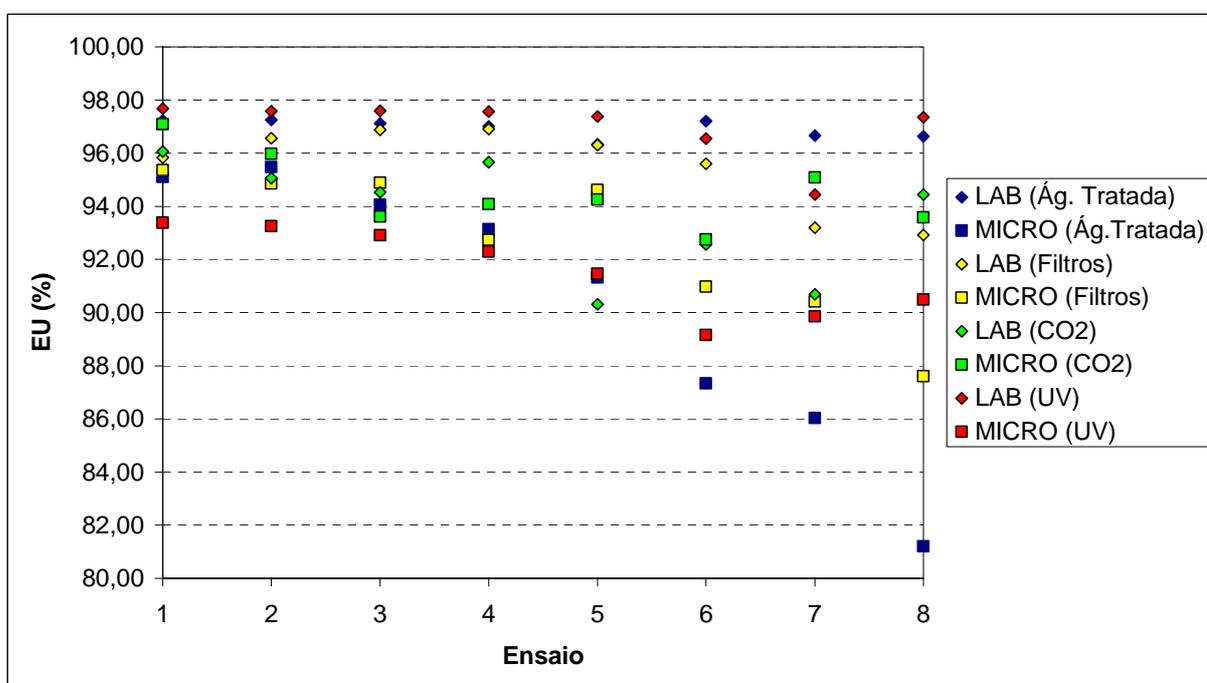


Figura 21 - Gráfico da variação da uniformidade de emissão (EU) de cada tratamento para a segunda repetição experimental de campo

Ao final das duas repetições experimentais, pode-se verificar um desempenho similar entre os dois tipos de gotejadores analisados. Dentre todos os tratamentos, apenas dois apresentaram desempenho médio classificado como bom em apenas uma das repetições (CO₂ com gotejadores do tipo labirinto e AP com microtubos). Embora alguns tratamentos com microtubos tenham apresentado desempenho menor do que os tratamentos com gotejadores do tipo labirinto, não é possível estabelecer diferenças significativas entre estes resultados e aqueles que receberam classificação excelente. A variação verificada entre os ensaios de vazão no campo sugere que o processo de entupimento dos gotejadores não é cumulativo e irreversível, uma vez que para um mesmo tratamento, os índices de uniformidade freqüentemente assumiram valores maiores do que os registrados em ensaios anteriores. Comportamento similar foi registrado por Puig-Bargués et al. (2005) na avaliação do processo de entupimento de gotejadores do tipo labirinto com uso de efluente de tratamento secundário.

Diante destes resultados e do número reduzidos de horas as quais os sistemas de irrigação funcionaram durante as duas fases deste experimento, optou-se por realizar um terceiro experimento no qual os gotejadores fossem submetidos a um longo período de testes. Desta forma, o desempenho dos dois tipos de gotejadores utilizados em sistemas de irrigação com fonte de água residuária poderia ser melhor avaliado e comparado. Cararo (2004) comparou o desempenho de diversos tipos de gotejadores, de diferentes marcas e modelos, em um ensaio de campo com água residuária da ETE Piracicamirim em um período de 373 horas. Puig-Bargés et al. (2005) submeteu gotejadores do tipo labirinto a três tipos de tratamentos da água residuária em ensaio de campo com duração total de 750 horas. Na presente pesquisa o tempo de funcionamento do terceiro experimento foi de 500 horas.

2.9.6 Tempo de funcionamento e volume aplicado aos tratamentos

As Tabelas 31 e 32 contêm os dados referentes ao tempo de aplicação para cada unidade de irrigação, volume de água e lâmina de água estimada para ambos os períodos de cultivo do pimentão.

Nota-se que, na primeira fase desta etapa de campo, o volume de água aplicado em média por planta foi menor para o tratamento AP. Os outros 3 tratamentos, abastecidos com água residuária, tiveram consumo de água entre 20 e 40% superior ao do tratamento AP durante o ciclo da cultura. Especialmente, as plantas dos tratamentos CO₂ e UV foram as que consumiram o

maior volume de água no período, entre 258 e 271 mL diários por planta. Visivelmente pôde-se constatar o maior desenvolvimento das plantas abastecidas com água residuária tratada, de forma que, com um maior índice de área foliar existe maior evapotranspiração da cultura e conseqüentemente maior demanda de água. Estes resultados já eram esperados já que efluentes de estações de tratamento de esgoto contêm nutrientes diversos, especialmente nitrogênio e fósforo. Silva (2002) em cultivo de pimentão em ambiente protegido em experimento conduzido até aos 153 DAT aplicou em média 400 mm para o tratamento em condições não salinas de solo.

Na segunda repetição experimental o consumo de água pelas plantas foi muito superior em relação à primeira fase para quase todos os tratamentos, influenciando diretamente o tempo de funcionamento de cada sistema de irrigação. Apenas no tratamento CO₂ foi verificada queda no consumo de água em relação à primeira repetição. O aumento da demanda de água nesta fase experimental está relacionado à elevação natural da temperatura no período. As plantas do tratamento CO₂ não tiveram, nesta repetição, um desenvolvimento tão bom quanto na primeira, o que pode explicar a queda no consumo de água.

Tabela 31 - Tempo de aplicação de água (TA), tempo dos ensaios de vazão (TE), tempo total de funcionamento do sistema (TF), volume total de água aplicado por planta (VA), volume médio diário aplicado por planta (VD), lâmina total de água aplicada por planta (LA), lâmina média diária aplicada por planta (LD) e acréscimo relativo ⁽¹⁾ (AC), para cada tratamento na primeira repetição experimental

	Tratamento							
	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
TA (h)	10,8	10,8	13,3	13,3	14,0	14,0	13,6	13,6
TE (h)	3,8	3,8	3,7	3,7	3,8	3,8	3,9	3,9
TF (h)	14,6	14,6	17,0	17,0	17,8	17,8	17,5	17,5
VA (L)	21,65	21,32	26,90	25,87	28,35	29,82	28,55	28,66
VD (mL)	197	194	245	235	258	271	260	261
LA (mm)	269	265	335	322	353	371	355	356
LD (mm)	2,4	2,4	3,0	2,9	3,2	3,4	3,2	3,2
AC (%)	-	-	24,28	21,31	30,97	39,84	31,90	34,39

⁽¹⁾ em relação ao tratamento abastecido com água potável, para cada tipo de gotejador.

Tabela 32 - Tempo de aplicação de água (TA), tempo dos ensaios de vazão (TE), tempo total de funcionamento do sistema (TF), volume total de água aplicado por planta (VA), volume médio diário aplicado por planta (VD), lâmina total de água aplicada por planta (LA), lâmina média diária aplicada por planta (LD) e acréscimo relativo⁽¹⁾ (AC), para cada tratamento na segunda repetição experimental

	Tratamento							
	AP		FAD		CO ₂		UV	
	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC	LAB	MIC
TA (h)	18,5	18,5	18,8	18,8	11,1	11,1	15,5	15,5
TE (h)	2,8	2,8	2,7	2,7	2,7	2,7	2,6	2,6
TF (h)	21,3	21,3	21,5	21,5	13,8	13,8	18,1	18,1
VA (L)	36,76	34,09	37,73	36,19	22,94	23,68	31,60	31,19
VD (mL)	328	304	337	323	205	211	282	278
LA (mm)	457	424	469	450	285	294	393	388
LD (mm)	4,1	3,8	4,2	4,0	2,5	2,6	3,5	3,5
AC (%)	-	-	2,64	6,18	-37,59	-30,53	-14,02	-8,51

⁽¹⁾ Em relação ao tratamento abastecido com água potável, para cada tipo de gotejador.

Observou-se também que as plantas dos tratamentos CO₂ e UV tiveram consumo menor de água quando comparadas às plantas do tratamento com água potável, comportamento inverso do registrado para as plantas do tratamento FAD. Os resultados obtidos nestas duas repetições refletiram na produtividade dos tratamentos, a qual será objeto de estudo e discussão no item seguinte.

2.9.7 Produtividade e classificação dos frutos

As análises estatísticas das variáveis produção e número de frutos por planta, peso, comprimento e largura dos frutos para cada tratamento, foram realizadas para as duas repetições experimentais em separado. Para as variáveis peso e largura dos frutos na primeira repetição experimental foram necessárias transformações dos dados originais de forma a atender aos requisitos de análise paramétrica de homogeneidade de variâncias e normalidade. Para a variável peso dos frutos foi utilizada a transformação logaritma (base 10) e para a largura média foi utilizada a transformação potencial (expoente igual a 4,9). A Tabela 33 contém os resultados relativos à produção obtida em cada um dos tratamentos, os quais possuíam 6 plantas (repetições). Serão apresentadas as análises de variância para cada variável em cada repetição

experimental. Quando houve diferença significativa entre os tratamentos, foi apresentada também a análise de comparação de médias pelo teste de Tukey. Além da análise dos dois fatores em estudo (tipo de água e tipo de emissor) foi realizado o desdobramento da interação entre os fatores. O desdobramento de tratamento *versus* emissor permite saber se houve efeito dos tratamentos dentro de cada emissor ou se houve efeito dos emissores dentro de cada tratamento. Em alguns casos, a análise de variância do modelo não acusa diferença significativa na interação entre os fatores, mas quando o desdobramento é realizado, é possível que seja detectada alguma diferença significativa. Só serão apresentados e discutidos os resultados dos desdobramentos que apresentaram diferenças significativas nas análises.

Tabela 33 – Análise de variância para produção por planta, na primeira repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	281130,2292	93710,0764	4,57	0,0076**
Emissor (B)	1	4402,393	4402,3937	0,21	0,6456
A*B	3	22644,8052	7548,2684	0,37	0,7763
Resíduo	40	819887,737	20497,193		
Total	47	1128065,165			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Segundo os dados apresentados na Tabela 33 foi verificada diferença altamente significativa entre os 4 tipos de água utilizadas nas parcelas de irrigação. Desta forma, pode-se afirmar, com 99% de confiança que há efeito dos tratamentos de água. Já para os tipos de emissor e para a interação de ambos os fatores, não foram detectadas diferenças significativas na análise do modelo. Após a realização do desdobramento da interação tratamento *versus* emissor foram obtidos os seguintes resultados:

Tabela 34 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para produção

Emissor	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
LAB	3	167733	55911	2,73	0,0566
MIC	3	136042	45347	2,21	0,1016

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Nota-se pelos resultados apresentados na Tabela 34 que não houve diferença significativa ao nível de significância de 5% para o emissor LAB, mas ao nível de 10%. Isto significa que, dentro do emissor LAB pode-se afirmar que foram detectadas diferenças entre os tratamentos de água, com 90% de confiança. De fato, os resultados médios de produção entre as parcelas que dispunham de gotejadores do tipo labirinto diferiram bastante (Tabela 35).

A Tabela 35 a seguir contém os dados médios de produção obtidos para cada tratamento, além dos valores de desvio padrão, produtividade estimada e produtividade relativa.

Tabela 35 – Resultados de produção por planta, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (g)	Desvio Padrão (g)	Produtividade (kg ha⁻¹)⁽¹⁾	Produtividade relativa⁽¹⁾ (kg ha⁻¹ mm⁻¹)
AP	LAB	6	272,6	76,9	6.815	25,3
AP	MIC	6	343,3	57,3	8.582	32,4
FAD	LAB	6	453,4	62,5	11.335	33,8
FAD	MIC	6	481,4	173,4	12.035	37,4
CO ₂	LAB	6	494,6	156,3	12.365	35,0
CO ₂	MIC	6	522,3	101,6	13.057	35,2
UV	LAB	6	416,2	199,6	10.405	29,3
UV	MIC	6	366,6	215,0	9.165	25,7

⁽¹⁾ Estimada, considerando 25.000 plantas por hectare.

O tratamento que obteve maior produção de frutos por planta foi o CO₂ contendo gotejadores do tipo microtubo, com média de 522,3 g planta⁻¹. As maiores produtividades foram obtidas para o tratamento CO₂, seguida dos tratamentos FAD, UV e AP, nesta ordem. No entanto as variabilidades calculadas para os tratamentos FAD, UV e CO₂ foram bastante elevadas.

A maior produtividade obtida para o tratamento CO₂ pode ser atribuída ao dióxido de carbono injetado na água. Este diminui temporariamente o pH do solo, disponibilizando nutrientes para as plantas. Para Pinto et al. (1999) a redução do pH proporciona elevação na disponibilidade de fósforo e cálcio na solução do solo e favorece a absorção de zinco e manganês. Em seu estudo com aplicação de dióxido de carbono em cultivo de melão irrigado em ambiente protegido os autores concluíram que a produtividade foi maior para as plantas submetidas ao tratamento com aplicação artificial de CO₂ e observaram a elevação relativa de 94,2% na concentração de potássio nos frutos. Gomes (2001) verificou a elevação do teor de potássio em

63,3% nas folhas de alface analisadas e aumento de 26% na produtividade do tratamento com injeção de dióxido de carbono quando comparado a tratamento testemunha.

Verificou-se que a produtividade média obtida para os oito tratamentos foi baixa se comparada aos valores comercialmente obtidos para o Estado de São Paulo, de 27,3 Mg ha⁻¹, apesar do período no qual o experimento foi conduzido (maio a setembro) não seja o mais recomendado para a produção de pimentão. Houve frutos que sofreram queimaduras de sol ou apresentaram podridão apical por falta de cálcio e frutos deformados que foram descartados em todos os tratamentos. O período de colheita realizado entre os dias 29 de julho e 31 de agosto de 2005, ou seja, 33 dias, foi sensivelmente inferior ao praticado em cultivos comerciais. Segundo Filgueira (2003) o período de colheita varia em função do cultivar, mas, em geral, para o pimentão pode ser superior a 100 dias. Tavares (2006), em experimento em ambiente protegido com cultura de pimentão, observou que as plantas aos 150 DAT apresentavam pleno crescimento e que a colheita poderia ser prolongada além desta data. A produtividade média registrada no melhor entre os 16 tratamentos de sua pesquisa, que constituíam em diferentes combinações de dosagens de N e K em fertirrigação por gotejamento, foi de 21,5 Mg ha⁻¹, para uma densidade de plantio de 13.385 plantas ha⁻¹ do híbrido Margarita. Já Silva (2002) obteve, para a cultura do pimentão (híbrido Elisa) produtividade de 37,0 Mg ha⁻¹ com ciclo conduzido até os 153 DAT. Cabe registrar que este autor utilizou em sua pesquisa de campo vasos com capacidade para 62 L de solo, volume muito superior ao de 12 L utilizado neste experimento. Na presente pesquisa, ao final da primeira repetição, quando foi realizada a troca dos solos para a condução da segunda repetição experimental, observou que as raízes das plantas estavam densamente acomodadas, tendo ocupado todo o volume disponível dos vasos. Este, talvez, tenha sido mais um fator limitante ao desenvolvimento da cultura.

Analisando-se os valores de produtividade relativa, ou seja, produção por área e por lâmina d'água aplicada, a ordem dos melhores tratamentos é alterada. Neste caso, o tratamento FAD com gotejadores microtubos assume o melhor desempenho com 37,4 kg ha⁻¹ mm⁻¹, seguido pelo tratamento CO₂ com microtubos e CO₂ com gotejadores do tipo labirinto. Este parâmetro é bastante importante do ponto de vista econômico, uma vez que o custo de irrigação assume um crescimento linear em função do volume de água utilizado no ciclo da cultura.

Uma vez detectada a diferença significativa entre os níveis do fator tipo de água, foi realizado o teste de Tukey para determinação do tratamento que obteve melhor desempenho nesta etapa (Tabela 36).

Tabela 36 – Resultados do teste de Tukey para produção por planta, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Média (g)	N	Grupo (1)
CO ₂	508,4	12	A
FAD	467,4	12	A
UV	391,4	12	AB
AP	308,0	12	B

⁽¹⁾ Letras iguais agrupam médias sem diferença significativa ao nível de 5%.

Verifica-se que os melhores tratamentos, em termos produtivos, foram CO₂ e FAD, sem diferença significativa entre os mesmos. Foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos CO₂ e FAD em relação ao AP, porém todos estes tratamentos não diferiram significativamente em relação ao UV.

A variável número de frutos por planta também apresentou diferença altamente significativa (ao nível de significância de 1%) para o fator tipo de água. Já para o fator emissor, assim como a interação entre os fatores, não foram observadas diferenças significativas na análise de variância do modelo (Tabela .37).

Tabela 37 – Análise de variância para o número de frutos por planta, na primeira repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	28,08333333	9,361111111	5,13	0,0043**
Emissor (B)	1	0,08333333	0,08333333	0,05	0,8319
A*B	3	2,75000000	0,91666667	0,50	0,6829
Resíduo	40	73,00000000	1,82500000		
Total	47	103,9166667			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

No desdobramento da interação tratamento *versus* emissor foi encontrado efeito significativo de tratamentos dentro do emissor MIC (Tabela 38), ou seja, com 95% de certeza

pode-se afirmar que o número de frutos para as parcelas contendo microtubos diferiu em função dos tipos de água.

Tabela 38 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para o número de frutos

Emissor	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
LAB	3	10,83333333	3,611111	1,98	0,1326
MIC	3	20,0000000	6,666667	3,65	0,0203*

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

A Tabela 39 apresenta as médias e respectivos desvios padrão da média para os oito tratamentos. Nota-se grande variabilidade das médias obtidas.

Tabela 39 – Resultados do número de frutos por planta, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média	Desvio Padrão
AP	LAB	6	2,8	0,7
AP	MIC	6	3,0	0,6
FAD	LAB	6	4,2	0,4
FAD	MIC	6	4,3	1,4
CO ₂	LAB	6	4,7	1,5
CO ₂	MIC	6	5,3	1,5
UV	LAB	6	4,0	2,1
UV	MIC	6	3,3	1,6

Os resultados referentes aos números de fruta colhidos por tratamento neste período experimental concordam com os resultados obtidos para a variável produção. Os tratamentos que mais se destacaram foram, na ordem, CO₂ com microtubos com média de 5,3 frutos por planta, CO₂ com gotejadores tipo labirinto (4,7 frutos por planta) e FAD com microtubos (4,3 frutos por planta). Os tratamentos que apresentaram pior desempenho foram os abastecidos com água potável.

As duas variáveis de produção até aqui discutidas comprovaram um desempenho superior dos tratamentos abastecidos com água de reuso, rica em nutrientes. A Tabela 40 apresenta os resultados do teste de Tukey para as médias obtidas nos tratamentos de água.

Tabela 40 – Resultados do teste de Tukey para o número de frutos por planta, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Média	N	Grupo (1)
CO ₂	5,0	12	A
FAD	4,3	12	AB
UV	3,7	12	AB
AP	2,9	12	B

⁽¹⁾ Letras iguais agrupam médias sem diferença significativa ao nível de 5%.

A quantidade de frutos por planta diferiu significativamente entre os dois tratamentos que apresentaram resultados extremos, CO₂ com o melhor e AP com o pior desempenho. Já os tratamentos FAD e UV apresentaram resultados intermediários, sem diferença significativa, ao nível de significância de 5%, dos outros dois tratamentos.

As Tabelas 41 a 43 contêm os resultados da variável peso dos frutos entre os distintos tratamentos. Verifica-se que nenhum fator de estudo, nem a interação entre eles, apresentou diferença significativa na análise de variância para o modelo. No entanto, o desdobramento da interação tratamento *versus* emissor acusou diferença significativa entre os emissores para o tratamento AP (Tabela 42). Desta forma, foi comprovado efeito significativo do emissor dentro deste tratamento. Observa-se pelos valores apresentados na Tabela 43 que a parcela contendo microtubos apresentou melhor desempenho que a com gotejadores do tipo labirinto para o tratamento AP, com relação à variável peso dos frutos. Exceto por esta diferenciação dos tratamentos, verificou-se uniformidade na produção de frutos do cultivar em estudo, mesmo havendo diferença significativa na quantidade de frutos produzidos entre plantas dos distintos tratamentos.

Tabela 41 – Análise de variância para o peso dos frutos, na primeira repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	0,00434486	0,00144829	0,37	0,7777
Emissor (B)	1	0,00363188	0,00363188	0,92	0,3436
A*B	3	0,01868494	0,00622831	1,58	0,2104
Resíduo	40	0,15814666	0,00395367		
Total	47	0,18480834			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

Tabela 42 – Resultados do desdobramento da interação entre tratamento e emissor, para o peso de frutos

Emissor	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
AP	1	0,019210	0,019210	4,86	0,0333*
CO ₂	1	0,002539	0,002539	0,64	0,4277
FAD	1	0,000129	0,000129	0,03	0,8577
UV	1	0,000440	0,000440	0,11	0,7405

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Tabela 43 – Resultados de peso dos frutos, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (g)	Desvio Padrão (g)
AP	LAB	6	96,2	23,8
AP	MIC	6	114,4	23,3
FAD	LAB	6	108,8	27,5
FAD	MIC	6	111,1	37,9
CO ₂	LAB	6	106,0	26,8
CO ₂	MIC	6	97,9	29,5
UV	LAB	6	104,1	27,1
UV	MIC	6	110,0	39,0

Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos para o comprimento de frutos em cada tratamento (Tabela 44 e 45). Embora a análise de variância tenha detectado diferença significativa entre os tratamentos de água, o teste de Tukey não foi capaz de detectar diferenças entre os mesmos (Tabela 46).

Tabela 44 – Análise de variância para o comprimento de frutos, na primeira repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	917,3213500	305,7737833	3,16	0,0349*
Emissor (B)	1	108,8416333	108,8416333	1,12	0,2952
A*B	3	95,1919500	31,7306500	0,33	0,8051
Resíduo	40	3870,119967	96,752999		
Total	47	4991,474900			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Tabela 45 – Resultados do comprimento de frutos, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
AP	LAB	6	110,2	11,5
AP	MIC	6	110,3	9,3
FAD	LAB	6	97,5	6,6
FAD	MIC	6	102,4	9,4
CO ₂	LAB	6	103,2	9,0
CO ₂	MIC	6	103,6	3,4
UV	LAB	6	106,7	12,3
UV	MIC	6	113,3	13,4

Tabela 46 – Resultados do teste de Tukey para o comprimento de frutos, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Média (mm)	N	Grupo (1)
AP	110,2	12	A
UV	110,0	12	A
CO ₂	103,4	12	A
FAD	100,0	12	A

⁽¹⁾ Letras iguais agrupam médias sem diferença significativa ao nível de 5%.

As Tabelas 47 e 48 apresentam os resultados dos valores obtidos para a largura média dos frutos. Nota-se que, assim como a variável peso de frutos, não foram detectadas diferenças significativas entre os tratamentos na análise de variância do modelo. Assim, as diferenças observadas entre os tratamentos (Tabela 48) não podem ser associadas aos dois fatores em estudo.

De uma forma geral, as variáveis associadas às dimensões e peso dos frutos indicam haver uniformidade na produção de frutos pelo cultivar, independentemente dos tipos de água e emissores empregados no sistema de irrigação. Esta é uma característica importante para garantir a qualidade da produção e um padrão para comercialização da produção.

A classificação comercial dos frutos de pimentão baseia-se, essencialmente, nas suas características de cor, forma e dimensões. Com base nos resultados obtidos para a primeira repetição experimental, os frutos da variedade cultivada podem ser classificados como: grupo retangular; subgrupo verde; classe 10 (comprimento entre 10 e 12 cm, exceto para os frutos do tratamento FAD irrigados pelos gotejadores labirinto que apresentaram comprimento médio da classe 8 (entre 8 e 10 cm); subclasse 4 (largura do fruto entre 4 e 6 cm) para os frutos produzidos

no tratamento UV, CO₂ e FAD com microtubos e AP com gotejadores tipo labirinto, e subclasse 6 (entre 6 e 8 cm) para os demais tratamentos.

Tabela 47 – Análise de variância para a largura de frutos, na primeira repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	1,6076752 10 ¹⁵	1,9169828 10 ¹⁵	0,05	0,9843
Emissor (B)	1	2,5448848 10 ¹⁶	2,5448848 10 ¹⁶	0,69	0,4124
A*B	3	1,2956773 10 ¹⁷	4,3189242 10 ¹⁶	1,16	0,3353
Resíduo	40	1,4838397 10 ¹⁸	3,7095992 10 ¹⁶		
Total	47	1,6446072 10 ¹⁸			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Tabela 48 – Resultados da largura de frutos, na primeira repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
AP	LAB	6	56,4	6,4
AP	MIC	6	60,4	6,1
FAD	LAB	6	61,6	6,6
FAD	MIC	6	57,8	8,7
CO ₂	LAB	6	60,9	6,7
CO ₂	MIC	6	56,9	6,8
UV	LAB	6	57,6	12,6
UV	MIC	6	58,8	11,1

Em seguida, apresentam-se os resultados obtidos na segunda repetição experimental para as mesmas variáveis em estudo. Em função das perdas de unidades experimentais nesta fase do experimento, os diferentes tratamentos tiveram o número de repetições variados, entre 4 e 6 plantas. Esta diferença ocasionou em perda de graus de liberdade nas análises de variância, prejudicando a detecção de diferenciação entre os tratamentos. As perdas foram causadas por podridão apical das plantas. A infestação da doença, atribuída a presença de fungos no solo, foi controlada com aplicação sistemática (semanal) de fungicida. Além disso, algumas plantas, principalmente dos tratamentos CO₂ e UV sofreram com a presença de ácaros, prejudicando o seu pleno desenvolvimento. Desta forma, a perda de qualidade dos resultados obtidos nesta repetição experimental foi irreversível.

A Tabela 49 contém os resultados obtidos para a variável produção por planta para a segunda repetição experimental. Verifica-se que nesta etapa houve diminuição dos graus de liberdade totais e, conseqüentemente, do resíduo, elevando o seu quadrado médio. Não foram detectadas diferenças significativas para os fatores tipo de água e emissor, nem para a interação dos fatores.

Tabela 49 – Análise de variância para produção por planta, na segunda repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	31916,81565	10638,93855	0,80	0,5017
Emissor (B)	1	7,64586	7,64586	0,00	0,9810
A*B	3	33381,58900	11127,19633	0,84	0,4823
Resíduo	34	451300,0627	13273,5313		
Total	41	524827,0605			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

A Tabela 50 apresenta os resultados médios obtidos em cada tratamento, acrescido dos valores de desvio padrão da média, produtividade estimada e produtividade relativa. Além das perdas de unidades experimentais das parcelas, verificaram-se baixos valores de produtividade e produtividade relativa, quando comparados aos resultados da primeira repetição experimental. As baixas produções obtidas nesta repetição podem ser atribuídas ao curto período de colheita dos frutos (33 dias), às elevadas temperaturas registradas no interior da casa de vegetação neste período e dos problemas advindos da proliferação de ácaro nas plantas dos tratamentos CO₂ e UV. As plantas sofreram estresse visível durante as horas mais quentes do dia. Com certa frequência, fazia-se necessário irrigá-las pela manhã e pela tarde. Além disso, muitos frutos foram abortados pelas plantas ainda no início de sua formação em decorrência das altas temperaturas. Segundo Boswell et al. (apud TAVARES, 2006), temperaturas superiores a 35°C prejudicam o pegamento de frutos de pimentão. Nota-se que houve pouca diferença nos valores de produtividade, que segundo a análise de variância foi não significativo. Tavares (2006) considerou em seu experimento em ambiente protegido com a cultura do pimentão que as elevadas temperaturas médias registradas (em torno de 30°C) foram responsáveis pela elevada produção de frutos defeituosos e queda na produção de seus tratamentos.

As maiores produtividades ocorreram nas parcelas com microtubos e tratamento FAD, seguida pelos tratamentos com água potável. O pior resultado foi registrado na parcela com microtubos e aplicação de dióxido de carbono. Assim como na primeira repetição experimental, as ordens dos tratamentos que obtiveram os melhores resultados são alteradas quando são consideradas as produtividades relativas. Considerando-se a lâmina aplicada no período neste cálculo o melhor tratamento passa a ser a parcela irrigada com gotejadores do tipo labirinto e CO₂, e o pior a parcela com gotejadores do tipo labirinto e filtros de areia e disco. Ibrahim (1992 apud GOMES, 2001) observou incremento na eficiência do uso da água pelas plantas a partir da aplicação de dióxido de carbono via água de irrigação.

Tabela 50 – Resultados de produção por planta, na segunda repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (g)	Desvio Padrão (g)	Produtividade⁽¹⁾ (kg ha⁻¹)	Produtividade relativa⁽¹⁾ (kg ha⁻¹ mm⁻¹)
AP	LAB	5	257,4	36,8	6.435	14,1
AP	MIC	4	243,8	132,1	6.095	14,4
FAD	LAB	5	202,0	102,1	5.050	10,8
FAD	MIC	6	286,1	164,8	7.152	15,9
CO ₂	LAB	4	218,5	161,1	5.462	19,2
CO ₂	MIC	6	141,7	52,1	3.542	12,0
UV	LAB	6	230,7	130,7	5.767	14,7
UV	MIC	6	233,6	69,1	5.840	15,1

⁽¹⁾ Estimada, considerando 25.000 plantas por hectare.

Resultados semelhantes ocorreram para as demais variáveis relacionadas ao número de frutos por planta, peso, comprimento e largura dos frutos (Tabelas 51 a 58). Nenhum fator, bem como a interação dos mesmos, diferiu significativamente nos seus níveis adotados.

Nota-se pelos resultados apresentados na Tabela 52 que poucos frutos produzidos pelas plantas, independentemente do tratamento analisado, conseguiram se desenvolver no período. Os valores médios obtidos são baixos, refletindo o problema da exposição das plantas às elevadas temperatura ambiente e problemas advindos da presença de ácaros.

Tabela 51 – Análise de variância para o número de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	0,47603943	0,15867981	0,18	0,9090
Emissor (B)	1	0,12925532	0,12925532	0,15	0,7039
A*B	3	2,89181144	0,96393715	1,10	0,3643
Resíduo	34	29,91666667	0,87990196		
Total	41	33,33333333			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Tabela 52 – Resultados do número de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média	Desvio Padrão
AP	LAB	5	2,2	0,4
AP	MIC	4	2,8	1,5
FAD	LAB	5	2,0	0,8
FAD	MIC	6	2,5	1,0
CO ₂	LAB	4	2,6	0,5
CO ₂	MIC	6	1,8	0,8
UV	LAB	6	2,3	1,2
UV	MIC	6	2,5	0,8

Embora tenham sido produzidos poucos frutos nesta repetição experimental, e conseqüentemente a produção das plantas tenha sido reduzida, os valores médios dos pesos dos frutos registrados nesta fase não diferiram em ordem de grandeza daqueles obtidos na primeira repetição. Outro aspecto que chama a atenção é a variação observada nos valores de desvio padrão da média entre tratamentos (Tabela 54).

Tabela 53 – Análise de variância para o peso dos frutos, na segunda repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	3837,578588	1279,192863	1,27	0,2992
Emissor (B)	1	860,912138	860,912138	0,86	0,3612
A*B	3	1243,374002	414,458001	0,41	0,7451
Resíduo	34	34163,05748	1004,79581		
Total	41	40319,83244			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

(1) Graus de Liberdade.

(2) Soma dos Quadrados.

(3) Quadrado Médio.

Tabela 54 – Resultados de peso dos frutos, na segunda repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (g)	Desvio Padrão (g)
AP	LAB	5	118,246000	12,1204200
AP	MIC	4	89,115000	6,3435243
FAD	LAB	5	104,842500	37,4120715
FAD	MIC	6	104,591667	35,9989997
CO ₂	LAB	4	82,622000	52,5613306
CO ₂	MIC	6	78,711667	8,0657583
UV	LAB	6	98,973333	45,2416828
UV	MIC	6	95,540000	15,2707799

Pela análise dos resultados do peso e dimensão dos frutos, sem diferenciação significativa resultante da análise estatística, reforça-se a idéia de que, mesmo com reduzida produtividade, as plantas deste cultivar produzem frutos uniformes.

Os resultados médios obtidos para o comprimento dos frutos são muito semelhantes aos registrados na fase anterior (Tabela 56).

Tabela 55 – Análise de variância para o comprimento de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	705,5938907	235,1979636	0,70	0,5600
Emissor (B)	1	51,9801600	51,9801600	0,15	0,6970
A*B	3	209,3582011	69,7860670	0,21	0,8909
Resíduo	34	11463,80521	337,1707400		
Total	41	12499,43478			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

Com base nas dimensões médias dos frutos registradas na segunda repetição experimental, determinou-se a seguinte classificação: classe 10 para todos os tratamentos, exceto pelos frutos do CO₂ que apresentaram comprimento médio da classe 8 (entre 8 e 10 cm), embora a média esteja mais próxima de 10 cm. A subclasse (em função da largura dos frutos) é de nível 4 (largura do fruto entre 4 e 6 cm) para todos os tratamentos, exceto pelos frutos produzidos no tratamento FAD com microtubos que é classificado como subclasse 6.

Tabela 56 – Resultados do comprimento de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
AP	LAB	5	113,6	6,9
AP	MIC	4	103,8	7,5
FAD	LAB	5	103,3	22,7
FAD	MIC	6	104,5	16,0
CO ₂	LAB	4	98,1	31,1
CO ₂	MIC	6	95,6	13,7
UV	LAB	6	102,2	25,3
UV	MIC	6	104,2	7,2

Tabela 57 – Análise de variância para a largura de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Fonte de variação	G. L. (1)	S. Q. (2)	Q. M. (3)	Valor de F	Pr > F
Tipo de água (A)	3	454,9547294	151,6515765	1,40	0,2593
Emissor (B)	1	7,3859592	7,3859592	0,07	0,7955
A*B	3	161,5492314	53,8497438	0,50	0,6865
Resíduo	34	3679,998510	108,235250		
Total	41	4403,216962			

Nota: * - significativo (5%); ** altamente significativo (1%).

⁽¹⁾ Graus de Liberdade.

⁽²⁾ Soma dos Quadrados.

⁽³⁾ Quadrado Médio.

Tabela 58 – Resultados da largura de frutos por planta, na segunda repetição experimental

Tipo de água	Emissor	N	Média (mm)	Desvio Padrão (mm)
AP	LAB	5	57,7	3,3
AP	MIC	4	54,9	4,1
FAD	LAB	5	57,8	11,2
FAD	MIC	6	63,4	17,4
CO ₂	LAB	4	54,0	15,3
CO ₂	MIC	6	48,8	3,3
UV	LAB	6	54,8	10,0
UV	MIC	6	53,8	6,5

Terminada a segunda etapa experimental podem-se destacar alguns resultados obtidos com relação aos índices produtivos obtidos nas duas repetições. Em virtude dos problemas anteriormente relatados ocorridos segunda repetição experimental, principalmente devido às elevadas temperaturas, devem ser priorizados os resultados obtidos na primeira repetição. Desta forma, verificou-se que não houve influência do tipo de gotejador na produtividade das parcelas

irrigadas. Os melhores resultados em termos de produção ocorreram para os tratamentos irrigados com água residuária, confirmando o benefício da presença de nutrientes tais como o nitrogênio e fósforo no efluente da ETE Piracicamirim. O melhor desempenho do tratamento CO₂ pode estar associado a maior disponibilidade de nutrientes em função da queda do pH do solo. Por fim, os frutos produzidos pelo cultivar em estudo apresentaram grande uniformidade no peso, comprimento e largura, independentemente do tratamento e da época de cultivo.

2.9.8 Resultados do terceiro experimento

A Tabela 59 contém os dados de vazão obtidos nos ensaios da última etapa experimental para os quatro tratamentos do experimento. Verifica-se que, após as 500 horas de ensaios, as vazões de todos os tratamentos apresentaram quedas substanciais, especialmente para as parcelas irrigadas com gotejadores do tipo microtubo.

Tabela 59 – Resultados das vazões médias (Q, L h⁻¹) para cada tratamento da água

Ensaio	Tempo (h)	Tratamento			
		FD		FD + UV	
		MIC	LAB	MIC	LAB
1	0	2,17	2,13	2,05	1,96
2	100	2,21	2,23	1,88	2,01
3	200	1,70	2,20	2,34	1,89
4	300	1,33	1,93	1,49	2,11
5	400	0,83	2,04	0,60	1,73
6	500	0,48	1,95	0,40	1,74

Para expressar a queda dos valores de vazão entre os ensaios, realizados a cada 100 horas de funcionamento do sistema, foram calculadas as quedas relativas das vazões considerando-se como referência a vazão obtida no primeiro ensaio (Tabela 60). Observou-se que a maior queda relativa ao final das 500 horas de ensaio ocorreu na parcela contendo tratamento de filtro de disco associado ao reator ultravioleta com microtubos (80,6%), seguida pela parcela irrigada com o mesmo gotejador e tratamento de água com filtro de disco (77,6%). Para os tratamentos com gotejadores do tipo labirinto as quedas relativas de vazão foram muito inferiores, atingindo 11,3% para o tratamento associado do reator ultravioleta e filtro de disco e 8,2% para o tratamento com filtro de disco, ao final do período experimental. Estes valores são próximos ao

limite aceitável de 10% de variação de vazão para irrigação por gotejamento. Cararo (2004) obteve reduções de vazão inferiores a 10%, após 373 horas de ensaios com água residuária, para 7 dos 15 modelos de gotejadores testados. Eventuais elevações de vazão verificadas em ensaios com maior número de horas acumuladas foram verificadas em para os dois tipos de gotejadores e tratamentos de água. Este comportamento pode ser relacionado à influência da temperatura da água sobre a vazão dos emissores, especialmente para o microtubos, e variações de pressão nas linhas laterais.

Tabela 60 – Resultados da variação relativa (%) da vazão ao longo do tempo

Ensaio	Tempo (h)	Tratamento			
		FD		FD + UV	
		MIC	LAB	MIC	LAB
1	0	-	-	-	-
2	100	2,1	4,6	-8,3	2,5
3	200	-21,6	3,3	14,2	-3,6
4	300	-38,8	-9,4	-27,4	7,4
5	400	-61,8	-4,0	-70,8	-11,8
6	500	-77,6	-8,2	-80,6	-11,3

A variação relativa dos valores de vazão para cada tratamento ao longo do tempo podem ser visualizada no gráfico da Figura 22. Observa-se a acentuada queda nos valores relativos da vazão para os tratamentos contendo microtubos. Apesar do claro processo de entupimento observado ao longo do tempo de ensaios, não foram detectados casos de completa obstrução dos emissores. Resultados semelhantes foram obtidos por Puig-Bargués et al. (2005) para parcela com gotejadores do tipo labirinto com efluentes de tratamento terciário. Segundo Ravina et al. (1992), o entupimento parcial dos gotejadores é mais usual do que o total.

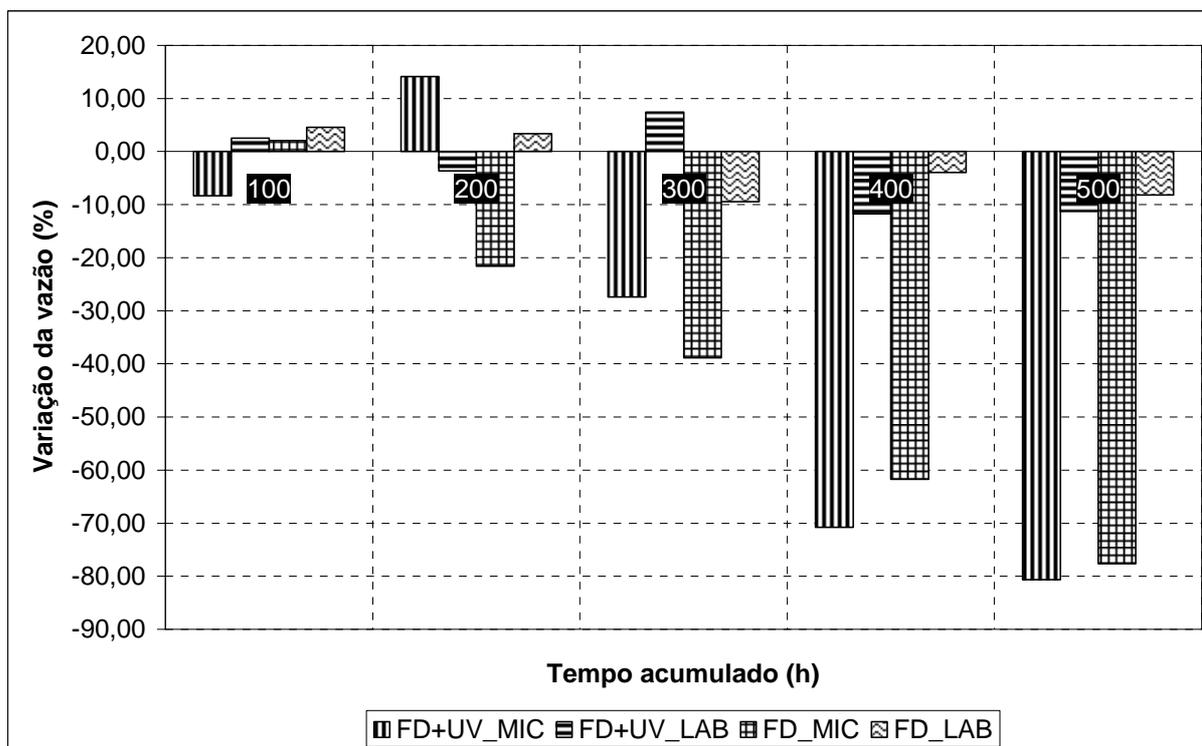


Figura 22 – Gráfico da variação relativa da vazão ao longo do tempo

A partir dos valores obtidos nos ensaios de vazão foram calculados os índices de uniformidade U_s e EU para cada tratamento. As Tabelas 61 e 62 e os gráficos das Figuras 23 e 24 contêm os resultados obtidos para cada ensaio.

Verificou-se que, apesar dos menores valores de vazão obtida para a parcela com tratamento associado do filtro de disco e reator ultravioleta em relação ao tratamento com filtro de disco, os valores de U_s ao final das 500 horas de ensaio foram maiores para o primeiro, independentemente dos tipos de gotejadores.

Segundo a evolução observada para os valores de U_s , nota-se que, desde o instante inicial até as 100 horas iniciais do ensaio, todos os tratamentos apresentaram resultado excelente, segundo classificação da ASAE (1998). A partir daí, observou-se rápido processo de entupimento dos microtubos e com 200 horas de ensaio as parcelas com gotejadores labirinto mantiveram valores de U_s no mesmo patamar, ao passo que o tratamento com filtro de disco e microtubos situava-se na classe ruim e o tratamento com filtro de disco e reator ultravioleta com microtubos atingia valor considerado inaceitável. Ao final das 500 horas, as duas parcelas contendo microtubos apresentaram valores de U_s muito inferiores ao limite inferior da classificação

inaceitável e os tratamentos filtro de disco com labirinto apresentou resultado aceitável. O tratamento filtro de disco associado à radiação ultravioleta com labirinto apresentou resultado bom.

Tabela 61 – Resultados de uniformidade estatística de emissão (Us, %) do ensaio de campo de 500 horas

		Tratamento			
		FD		FD + UV	
Ensaio	Tempo (h)	MIC	LAB	MIC	LAB
1	0	94,6 E	96,8 E	97,5 E	96,4 E
2	100	92,7 E	94,3 E	91,4 E	94,4 E
3	200	69,2 R	92,2 E	52,5 I	94,2 E
4	300	65,0 R	90,2 E	57,5 I	79,9 A
5	400	26,9 I	80,5 B	25,1 I	76,9 A
6	500	12,4 I	76,2 A	25,8 I	83,0 B

Nota: as letras após os números estão relacionadas as seguintes classes e intervalo entre classes: Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A), Ruim (R) e Inaceitável (I), segundo ASAE (1998).

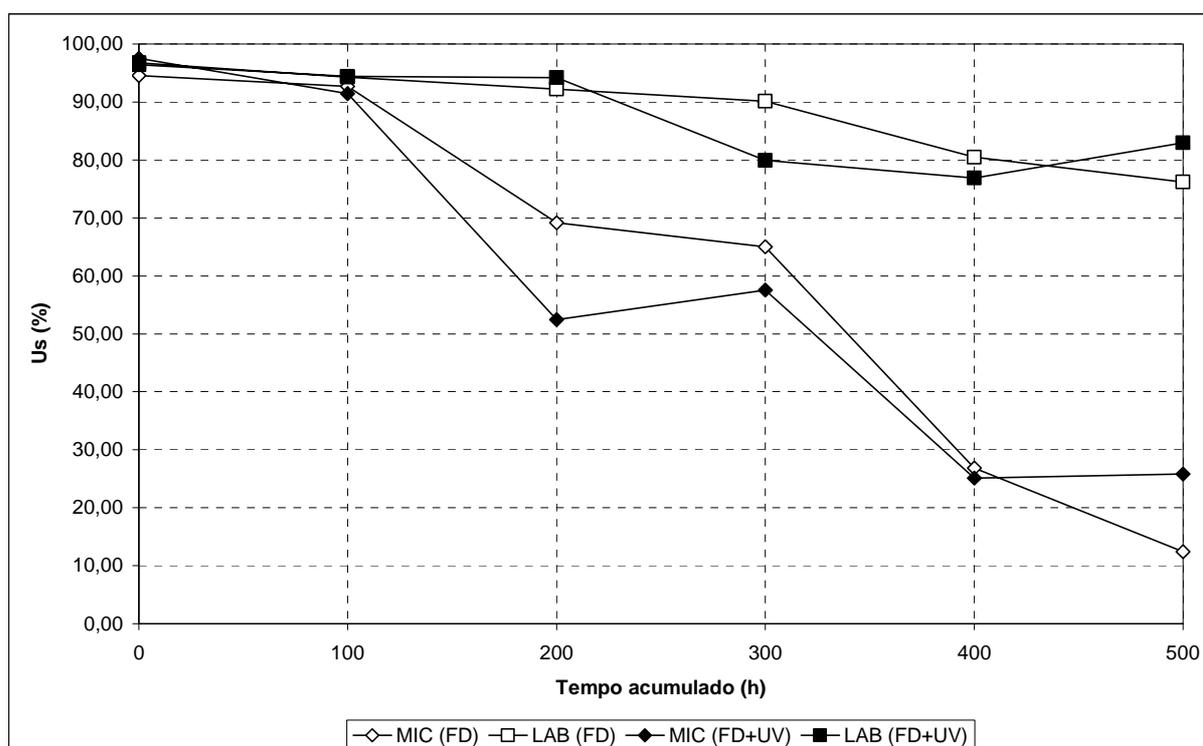


Figura 23 – Gráfico do perfil de variação da uniformidade estatística de emissão (Us) ao longo do tempo

Para o índice EU os resultados do ensaio inicial indicaram valores na faixa de excelente para todos os tratamentos. Ao final das 100 horas todos os tratamentos apresentaram resultados excelentes, exceto para a parcela com filtração de disco e reator ultravioleta com microtubos que apresentou resultado considerado bom. A partir do terceiro ensaio, ou seja, depois de decorridas 200 horas de ensaio, as parcelas contendo gotejadores do tipo labirinto mantiveram-se no mesmo patamar, ao passo que as parcelas contendo microtubos apresentavam classificação ruim. A tendência de queda para os valores de EU continuou mais acentuada para as parcelas com microtubos em relação às parcelas com gotejadores do tipo labirinto. Ao final das 500 horas de ensaio o valor de EU para o tratamento com filtro de disco associado ao reator UV situava-se na classe boa, já para o tratamento FD o valor era aceitável e para as duas últimas parcelas os valores estavam na faixa considerada ruim, bem abaixo de 70%.

Tabela 62 – Resultados de uniformidade de emissão (EU, %) do ensaio de campo de 500 horas

Ensaio	Tempo (h)	Tratamento			
		FD		FD + UV	
		MIC	LAB	MIC	LAB
1	0	94,2 E	96,0 E	97,0 E	96,2 E
2	100	90,6 E	93,1 E	87,3 B	93,4 E
3	200	59,4 R	90,7 E	52,0 R	93,5 E
4	300	57,1 R	90,3 E	41,7 R	79,5 A
5	400	20,8 R	80,6 B	18,0 R	77,0 A
6	500	14,2 R	70,9 A	17,7 R	84,4 B

Nota: as letras após os números estão relacionadas as seguintes classes e intervalo entre classes: Excelente (E), Bom (B), Aceitável (A) e Ruim (R), segundo ASAE (1998).

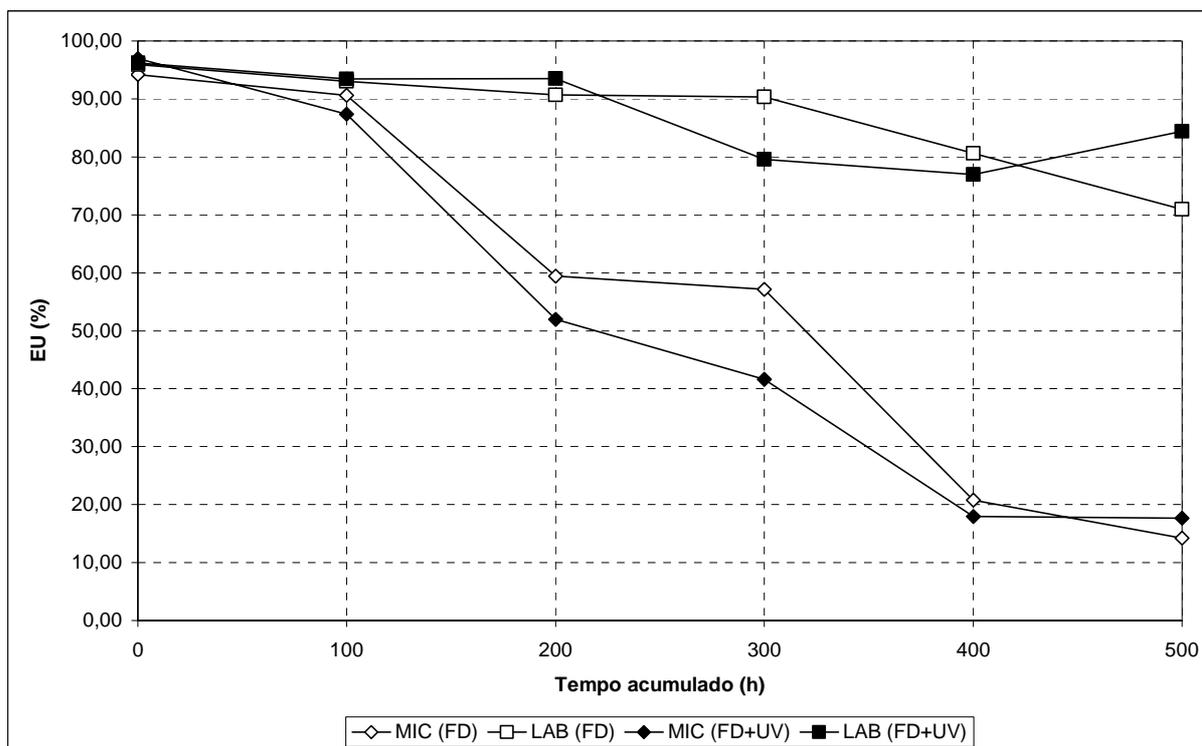


Figura 24– Gráfico do perfil de variação da uniformidade de emissão (EU) ao longo do tempo

Puig-Bargués et al. (2005) verificaram um rápido processo de entupimento depois de decorridas 485 horas de ensaio com gotejadores do tipo labirinto, para parcelas submetidas à irrigação com efluente de tratamento secundário filtrados por filtros de tela e disco. Os valores registrados de EU para estas parcelas se aproximaram de 55% ao final de 750 horas. Para um terceiro tratamento, utilizando efluente de tratamento terciário, filtrados por filtro de areia e submetidos à desinfecção por radiação ultravioleta e injeção de cloro ($5 \text{ mg NaClO L}^{-1}$), após as 750 horas de ensaio, os gotejadores do tipo labirinto ainda apresentavam valores de EU acima de 85%. Cararo (2004) registrou variações dos valores de EU entre 57,81 e 93,25% para 15 modelos de gotejadores submetidos a um ensaio com duração total de 373 horas, utilizando o efluente da ETE do Piracicamirim filtrado por filtros de areia, disco e tela.

Ao final das 500 horas de ensaio conclui-se que o tipo de gotejador foi o fator com efeito mais significativo na determinação do entupimento das parcelas irrigadas com água residuária. O desempenho dos gotejadores tipo labirinto foi significativamente superior ao dos microtubos. No entanto, há que ser considerado custo inicial dos emissores. Enquanto os gotejadores do tipo labirinto custam em média R\$ 0,50, o microtubo com comprimento de 75 cm (utilizado no

experimento) tem custo aproximado de R\$ 0,10. Nota-se portanto, uma relação de preços cinco vezes maior para os gotejadores do tipo labirinto em relação aos microtubos. Em função do tamanho do sistema de irrigação e da facilidade de detecção de emissores, total ou parcialmente entupidos, pode ser viável a sua troca, sem prejuízo ao desempenho do sistema. No entanto, custos adicionais de mão-de-obra para a realização de ensaios de vazão e troca de emissores devem ser considerados.

Com relação aos dois tipos de tratamento de água, em função da menor influência deste fator na prevenção do entupimento de emissores, não foram detectadas diferenças significativas aparentes. Para o melhor desempenho do reator ultravioleta na inativação de microorganismos a água deve ter a concentração de sólidos suspensos e turbidez reduzida. Possivelmente o filtro de disco, associado a um circuito hidráulico fechado, não possibilitou a redução destes parâmetros em níveis que possibilitassem a melhor performance do reator. Além disso, em função do sistema de irrigação ser constituído de um circuito fechado, e das baixas vazões empregadas nos tratamentos, a temperatura da água circulante deve ter absorvido o calor dissipado pela bomba hidráulica, atingindo valores propícios para o pleno desenvolvimento de microorganismos na água residuária, entre 25 e 35 °C (VON SPERLING, 1996). Cararo (2004) registrou elevações da ordem de 4°C na passagem da água pelo conjunto motobomba em sua pesquisa de campo.

Embora não tenha havido condições de se verificar as vantagens do uso de reator ultravioleta neste último experimento, o mesmo foi válido para atestar que o gotejador do tipo labirinto é menos sensível que os microtubos quando comparados aos microtubos.

3 CONCLUSÕES

Considerando as condições nas quais os experimentos foram conduzidos, os resultados obtidos permitem concluir que:

A) Os gotejadores do tipo labirinto e microtubos com 75 cm apresentaram desempenho similares para um intervalo de pressão de serviço entre 90 e 110 kPa. Para gotejadores novos, quando submetidos a ensaios de vazão com água limpa, foram obtidos valores de coeficientes de variação de fabricação classificados como excelentes: 2,58% para os gotejadores do tipo labirinto e 2,53 para os microtubos, para uma pressão de serviço de 107,9 kPa.

B) Os valores dos coeficientes de descarga para os dois tipos de gotejadores ensaiados em laboratório foram coerentes com aqueles citados na literatura.

C) Os resultados das análises da água residuária utilizada no segundo experimento comprovaram a viabilidade técnica de seu uso em irrigação por gotejamento e a eficácia dos tratamentos empregados.

D) A filtração lenta apresentou remoção média de sólidos suspensos de 90,2% e 81,8% de turbidez da água, destacando-se na segunda repetição experimental.

E) A adição de dióxido de carbono na água de irrigação proveu reduções médias de 29,0 e 24,2% nas duas repetições experimentais.

F) Os tratamentos de desinfecção da água com radiação ultravioleta e com enriquecimento da água com dióxido de carbono apresentaram resultados expressivos na remoção média de *E. coli* e DBO_5 na segunda repetição experimental. O primeiro removeu 100% das bactérias e reduziu 50,1% a matéria orgânica da água. O tratamento com injeção de dióxido de carbono reduziu em 97,5% o número de *E. coli* e 24,5% os valores de DBO_5 .

G) Para as duas repetições do segundo experimento, não foram observadas diferenças significativas entre os dois tipos de gotejadores, considerando-se os valores de uniformidade estatística (U_S) e uniformidade de emissão (EU) obtidos. O tratamento com filtração lenta seguida pela desinfecção com radiação ultravioleta apresentou os melhores resultados para os coeficientes de uniformidade calculados, principalmente para as parcelas com gotejadores do tipo labirinto.

H) Em relação aos índices de produtividade do pimentão, apesar das baixas produtividades obtidas e verificou-se, na primeira repetição experimental, maior produtividade para o tratamento

CO₂ e FAD, significativamente superiores aos resultados obtidos no tratamento AP. Já a parcela contendo tratamento UV apresentou resultado intermediário. No entanto, destacaram-se os tratamentos irrigados com água residuária.

I) Pelos resultados obtidos no terceiro experimento, ficou comprovada a maior sensibilidade ao entupimento dos microtubos em relação aos gotejadores do tipo labirinto utilizados nesta pesquisa.

J) Um aprofundamento nos estudos com o emprego de filtração lenta e reator ultravioleta como tratamentos de água residuária para irrigação por gotejamento se faz necessário. A incorporação de pré-filtros como pré-tratamento à filtração lenta pode ser bastante positiva para um melhor desempenho do tratamento conjunto.

REFERÊNCIAS

ABDELLAH, A. R.; ASHBOLT, N. J. Innovative Production treatment hydroponic farm for primary municipal sewage utilization. **Water Resource**, Washington, v. 34, n. 3, p. 825-834, 2000.

ABU-RIZAIZA, O. S. Modification of the standards of wastewater reuse in Saudi Arabia. **Water Resource**, Washington, v. 33, n. 11, p. 2601-2608, 1999.

AGUIAR, A. M. S.; FERNADES NETO, M. L.; BRITO, L. L. A.; REIS, A. A.; MACHADO, P. M. R.; SOARES, A. F. S.; VIEIRA, M. B. C. M.; LIBÂNIO, M. Avaliação do emprego da radiação ultravioleta na desinfecção de águas com turbidez e cor moderadas. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 7, n. 1, p. 37-47, 2002.

AIROLDI, R. P. S. **Eficiência dos meios filtrantes disco e manta sintética não tecida em fertirrigação por gotejamento**. 2003. 204 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

AL-NAKSHABANDI, G.A. et al. Some environmental problems associated with the use of treated waste water for irrigation in Jordan. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v.34, p.81-94, 1997.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS. **EP 458**: field evaluation of microirrigation systems. St. Joseph, Estados Unidos, 1998. 7p.

AYERS, R. S.; WESTCOT, D. W. **A qualidade da água na agricultura**. Tradução de H. R. Gheyi; J.F. de Medeiros; F.A.V. Damasceno. Campina Grande: UFPB, 1999. 153 p.

BASTOS, R. K. X.; MARA, D. D. Avaliação dos critérios e padrões de qualidade microbiológica de esgotos sanitários tendo em vista sua utilização na agricultura. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA 17., 1993, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro: ABES, 1993. p. 422 – 439.

BASTOS, R. K. X.; NEVES, J. C. L.; BEVILACQUA, P. D.; SILVA, C. V.; CARVALHO, G. R. M. Avaliação da contaminação de hortaliças irrigadas com esgoto sanitário. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL 27., 2002, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: ABES, 2002. p.135-142.

BERNARDO, S. **Manual de irrigação**. 4.ed. Viçosa: Imprensa Universitária, 1986. 657p.

BOUYOUCUS, G. J. A recalibration of the hydrometer method for making mechanical analysis of soils, **Agronomy Journal**, Madison, v. 43, n. 9, p. 434-438, 1951.

BRALTS, V.F.; KESNER, C.D. Drip irrigation field uniformity estimation. **Transactions of ASAE**, St. Joseph, v. 26, n.5., p. 1369-1374, 1983.

BRANDÃO, L. P.; MOTA, S.; MAIA, L. F. Perspectivas do uso de lagoas de estabilização em irrigação. In: CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 17., 2002, Vitória. **Anais...** Vitória: ABES, 2002. p. 54-62.

BRITO, R. A. L.; COUTO, L.; SANTANA, D.P. Agricultura irrigada, recursos hídricos e produção de alimentos: uma interação produtiva e positiva. **Item**, Brasília, n. 55, p.64–69, 2002.

BUCKS, D. A.; NAKAYAMA, F. S. **Trickle irrigation for crop production: design, operation and management**. Amsterdam: Elsevier, 1986. 383p.

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

CAPRA, A.; SCICOLONE, B. Recycling of poor quality urban wastewater by drip irrigation systems. **Journal of Cleaner Production**, London, 2006. No prelo.

CARARO, D. C. **Manejo da irrigação por gotejamento para aplicação de água residuária visando a minimização do entupimento de emissores**. 2004. 129p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

CHRISTOFIDIS, D. Os recursos hídricos e a prática da irrigação no Brasil e no mundo. **Item**, Brasília, n. 49, p.8–13, 2001.

CHRISTOFIDIS, D. Irrigação, a fronteira hídrica na produção de alimentos. **Item**, Brasília, n. 54, p.46–55, 2002.

DASBERG, S.; BRESLER, E. **Drip Irrigation Manual**. Israel: International Irrigation Information Center (IIIC), 1985. 95p.

DI BERNARDO, L. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. Rio de Janeiro: ABES, 1993, 2v.

DOURADO, D. N.; SAAD, A. M.; LIER, Q. J. **Curso de agricultura irrigada**. Piracicaba: ESALQ, 1991. 190p.

DUARTE, A. S.; de LIMA, V. L. A.; van HAANDEL, A. C. Microbiological quality evaluation of pepper irrigated with treated wastewater. In: CIGR World Congress 15., 2002, San Francisco. **Meeting...** San Francisco: ASAE, 2002. p. 237-245.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1997. 212 p.

FILGUEIRA, F. A. R. **Solanáceas**: agrotecnologia moderna na produção de tomate, batata, pimentão, pimenta, berinjela e jiló. Lavras: UFLA, 2003. 331 p.

FRIZZONE, J.A.; GONÇALVES, A.C.A., REZENDE, R. Produtividade do pimentão amarelo, *Capsicum annum L.*, cultivado em ambiente protegido, em função do potencial mátrico de água no solo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 23, n. 5, p. 1111-1116, 2001.

GOMES, T. M. **Efeito do CO₂ aplicado na água de irrigação e no ambiente sobre a cultura do alface (*Lactuca sativa L.*)**. 2001. 83p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2001.

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.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso da água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. In: ENCONTRO DE LAS AGUAS, 3., 2001, Santiago. **Anais...** Santiago, 2001. p.1-32.

HESPANHOL, I. Potencial de reuso de água no Brasil: agricultura, indústria, municípios, recarga de aquíferos. **Bahia Análise & Dados**, Salvador, v.13, n. especial, p. 411-437, 2003.

HILLS, D.J.; BRENES, M.S. Microirrigation of wastewater effluent using drip tape. **Transaction of American Society of Agricultural Engineers**, St. Joseph, v. 17, n.3, p. 303-308, 2001.

HOWELL, T. Drops of life in history of irrigation. **Irrigation Journal**, Berlin, v. 50, p. 1-8, 2000.

INSTITUTO DE ECONOMIA AGRÍCOLA DE SÃO PAULO. **IEA**: banco de dados.

Disponível em <<http://www.iea.sp.gov.br/out/banco/menu.php>>. Acesso em: 01 nov. 2005.

JEFFERSON, B.; LAINE, A.; PARSONS, S.; STEPHENSON, T.; JUDD, S. Technologies for domestic wastewater recycling. **Urban Water**, Amsterdam, v. 1, p.285-292, 2000.

KELLER, J.; BLEISNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 652p.

LÉON S., G.; CAVALLINI, J. M. **Tratamento e uso de águas residuárias**. Tradução de H. R. Gheyi, A. König, B.S.O. Ceballos; F.A.V. Damasceno. Campinas Grande: UFPB, 1999. 110p.

LONDE, L. R.; PATERNIANI, J.E.S. Filtração lenta para reutilização de água em irrigação. **Irriga**, Botucatu, v. 8, n. 1, p. 10-20, 2003.

MADEIRA, V.S. **Desenvolvimento de um carvão adsorvente para remoção de íons ferro em águas naturais**. 2003. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Faculdade de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

MARCUSSI, F. F. N.; GODOY, L. J. G. de; VILLAS BOAS, R. L. Fertirrigação nitrogenada e potássica na cultura do pimentão baseada no acúmulo de N e K pela planta. **Irriga**, Botucatu, v.9, n. 1, p. 41-51, 2004.

MARQUELLI, W.A.; SILVA, H. R. da. **Aspectos Sanitários da água para fins de irrigação**. Brasília: Comunicado Técnico da EMBRAPA Hortaliças, 1998. 7p.

MERRIAM, J. L.; KELLER, J. **Farm irrigation system evaluation: a guide for management**. Utah: Logan, 1978. 271p.

MINAMI, K.; TESSARIOLI NETO, J. **Cultura do pimentão**. Piracicaba: SEBRAE, 1994. 57 p.

ORON, G.; CAMPOS, C.; GILLERMAN, L., SALGOT, M. Wastewater treatment, renovation and reuse for agricultural irrigation in small communities. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 38, p. 223-234, 1999.

PATERNIANI, J.E.S.; CONCEIÇÃO, C.H.Z. Eficiência da pré-filtração lenta no tratamento de água para pequenas comunidades. **Engenharia Ambiental**, Espírito Santo do Pinhal, v. 1, n. 1, p.17-24, 2004.

PEREIRA, A.L. **A Cultura do Pimentão**. Fortaleza: DNOCS, 1990. 50p.

PINTO, J.M.; BOTREL, T. A.; MACHADO, E. C.; FEITOSA FILHO, J C.; MEDINA, C. L. Aplicação de CO₂ via água de irrigação na cultura do melão em ambiente protegido. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.18, n. 3, p.1-10, 1999.

PIRES, M. R. **Desinfecção de esgotos com radiação ultravioleta**: influência na qualidade do efluente da fotorreativação. 2002. 110 p. Tese (Doutorado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 2002. 110 p.

PIZARRO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia**. 3.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

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, p.249-262, 2005.

RANGEL, V. Filtration for all seasons. **Irrigation Journal**, Berlin, v. 51, n. 3, p. 23, 2001.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G. Control of emitter clogging in drip irrigation with reclaimed wastewater. **Irrigation Science**, Berlin, v. 13, p.129-139, 1992.

RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G.; YECHIALY, Z.; LEV, Y. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 33, p. 127-137, 1997.

RESENDE, R. S. **Susceptibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica e avaliação do desentupimento via cloração da água de irrigação**. 1999. 77p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

RJISBERMAN, F. R. Water scarcity: fact or fiction? **Agricultural Water Managent**, Amsterdam, v. 80, p. 5-22, 2006.

RODRIGUEZ ROBLES, W. G. **Dióxido de carbono via fertirrigação em batateira (*Solanum tuberosum* L.) sob condições de campo**. 2003. 160 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

ROMAN, B. Tackling emitter clogging problems. **Irrigation Journal**, Berlin, v. 49, n. 4, p. 8, 1999.

SAHIN, Ü.; ANAPALI, Ö.; DÖNMEZ, M. F.; SAHIN, F. Biological treatment of clogged emitters in a drip irrigation system. **Journal of Environmental Management**, London, v.76, p.338-341, 2005.

SANT'ANA, T. D.; OLIVEIRA, F. F.; SANTOS NETO, J. V.; ZANDONADE, E.; KELLER, R.; GONÇALVES, R. F. Influência do tempo de funcionamento das lâmpadas UV na eficiência de reatores de desinfecção de esgoto sanitário por radiação ultravioleta. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22.,2003. **Anais...** Joinville: ABES, 2003. p. 1-5.

SHUVAL, H.; ADIN, A.; FATTAL, B.; RAWITZ, E.; YEKUTIEL, P. Health Effects of Wastewater Irrigation and their Control in Developing Countries. The World Bank. Integrated Resource Recovery Project Series, Number GLO/80/004, 1985. 340p.

SILVA, E. F. F. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade na cultura do pimentão utilizando extratores de solução do solo.** 2002. 136 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2002.

SOUZA, R. O. R. M.; BOTREL, T. A. Modelagem para dimensionamento de microtubos em irrigação por gotejamento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 8, n. 1, 2003, p. 16-22.

TANGERINO, E. P., DI BERNARDO, L.. Remoção de substâncias húmicas por meio da oxidação com ozônio e peróxido de hidrogênio e FiME. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, Rio de Janeiro, v. 10, n. 4, 2005, p. 290-298.

TAVARES, A. C. S. **Manejo da fertirrigação e controle da salinidade para a cultura do pimentão (*Capsicum annuum*) utilizando medidores de íons na solução do substrato.** 2005. 101 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

TELTSCH, B.; JUANICO, M.; AZOV, Y.; HARIM, I. B.; SHELEF, G. The clogging capacity of reclaimed wastewater: a new quality criterion for drip irrigation. **Water Science Technology**, Amsterdam, v. 24, n.9, p. 123-131, 1991.

TIBAU, A. O. **Técnicas modernas de irrigação:** aspersão, gotejamento, derramamento. São Paulo: Nobel, 1977. 339 p.

TIVELLI, S.W. A cultura de pimentão. In: GOTO R.; TIVELLI, S.W. (Org.) **Produção de hortaliças em ambiente protegido**: condições subtropicais. São Paulo: Fundação Editora da UNESP, 1998. p.225-257.

TSAGARAKIS, K. P, DIALYNAS, G. E., ANGEKALIS, A. N. Water resources management in Crete (Greece) including water recycling and reuse and proposed quality criteria. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 66, p. 35-47, 2004.

VARGAS, S. V. C, LOPEZ, C. E. V., MARA, D.D. Reutilização de efluentes para irrigação: uma alternativa para zonas áridas. In: SEMINÁRIO REGIONAL DE ENGENHARIA CIVIL, 1990, Recife. **Anais...** Recife, 1990. p. 626-637.

VERMEIREN, L.; JOBLING, G.A. Localized irrigation. **Irrigation and Drainage paper**, Rome, v.36, p. 1-203, 1980.

VON SPERLING, M. **Princípios do tratamento biológico de águas residuárias**: introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: DESA/UFMG, 1996. v. 2. 243p.

VOUTCHKOV, N. UV disinfection: an emerging technology. **Public Works**, Chicago, v.126, n. 9, p. 39–41, 1995.

WHO - World Health Organization. **Health guidelines for the use of wastewater in agriculture and aquaculture**: report of a WHO scientific group. Geneva: WHO, 1989. 74p. (Technical Report Series, 778).

WOJTENKO, I., STINSON, M. K., FILED, R. Challenges of combined sewer overflow disinfection by ultraviolet light irradiation. Critical Reviews in **Environmental Science and Technology**, Washington, v. 31, n. 3, p. 223–229, 2001.

APÊNDICES



Figura 1A – Vista parcial externa da estufa



Figura 2A – Vista parcial interna da estufa



Figura 3A – Vista superior de vaso com tensiômetro



Figura 4A – Filtros de areia e disco



Figura 5A – Vista frontal do da caixa de alimentação e do filtro lento



Figura 6A – Vista superior da caixa de entrada e do filtro lento



Figura 7A – Sistema de injeção de CO₂



Figura 8A – Reator ultravioleta



Figura 9A – Detalhe de vaso com gotejador tipo microtubo



Figura 10A – Detalhe de vaso com gotejador tipo labirinto



Figura 11A – Detalhe dos frutos de pimentão em desenvolvimento



Figura 12A – Vista parcial de linha de vasos com plantas de pimentão

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)