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

**Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra
baixa vazão utilizando microtubos ramificados**

Dinara Grasiela Alves

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

**Piracicaba
2010**

Dinara Grasiela Alves
Engenheiro Agrônomo

**Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão
utilizando microtubos ramificados**

Orientador:
Prof. Dr. **TARLEI ARRIEL BOTREL**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Irrigação e
Drenagem

**Piracicaba
2010**

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

Alves, Dinara Grasiela

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados / Dinara Grasiela Alves. - - Piracicaba, 2010.
86 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2010.
Bibliografia.

1. Custo econômico 2. Hortas 3. Irrigação por gotejamento 4. Microtubos 5. Modelos matemáticos I. Título

CDD 631.7
A474d

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

DEDICATÓRIA

Aos meus queridos e amados pais, José Lourenço e Adalgisa, pelo imenso apoio, pelos valiosos ensinamentos, pela educação e dedicação em todos os momentos de minha vida.

À minha irmã Gleiciane, pelos incentivos oferecidos em minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus pelas bênçãos concedidas em minha vida.

À minha família pelo amor, carinho e apoio.

Ao meu orientador, professor Dr. Tarlei, pela orientação, amizade, pelos incentivos e importantes ensinamentos.

À Professora Dra. Ceres pela co-orientação científica, pela amizade, pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho e por ter me apoiado nos momentos em que mais precisei.

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP), em especial ao Departamento de Engenharia de Biossistemas, pelo acolhimento e pela formação adquirida.

Aos professores do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ, pelos conhecimentos transmitidos.

Aos Funcionários do Departamento de Engenharia de Biossistemas e aos funcionários da Biblioteca Central pela atenção e ajuda prestada.

Às minhas amigas Cleucione, Marina e Alinne pelo companheirismo e amizade.

Aos meus companheiros de sala Alexsandro, Conan, Leonardo, Robson, Wanderley, Vanessa, Ana Paula, Antônio pela convivência e ajuda. E a Marinaldo (meu especial agradecimento), pelo seu amor, carinho, apoio, pela atenção e valiosa contribuição durante todo o experimento.

Aos professores da UFRPE Marcus Metri, Ênio Farias, Abelardo Montenegro, Izabel Galindo e Maria Betânia, pelos ensinamentos oferecidos e incentivos.

Ao professor do IFPE Pedro Paulo, pelo incentivo e amizade.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pela concessão da bolsa de estudos, ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCTEI).

A empresa PLASNOVA Louveira Ind. Com. Ltda. pela doação dos microtubos utilizados neste trabalho.

Aos amigos Benedito, Márcia, Brivaldo, Paulo Cardoso e Wellington pelo apoio, carinho e pela atenção. São pessoas muito especiais e importantes em minha vida.

Ao estagiário do GPID-ESALQ/USP Eduardo, pelo apoio na avaliação experimental.

E a todos que de forma direta ou indireta, contribuíram para realização deste trabalho.

"Comece fazendo o que é necessário, depois o que é possível, e de repente você estará fazendo o impossível."

São Francisco de Assis

"A ciência humana de maneira nenhuma nega a existência de Deus. Quando considero quantas e quão maravilhosas coisas o homem compreende, pesquisa e consegue realizar, então reconheço claramente que o espírito humano é obra de Deus, e a mais notável."

Galileu Galilei

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS	15
LISTA DE TABELAS	17
1 INTRODUÇÃO	19
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	21
2.1 Agricultura irrigada	21
2.2 Uso de microtubos na microirrigação	23
2.3 Hidráulica dos microtubos-gotejadores	24
2.4 Hidráulica de linhas laterais.....	27
2.5 Avaliação de sistemas de microirrigação	28
2.6 Modelo matemático na irrigação	31
3 MATERIAL E MÉTODOS	35
3.1 Localização e etapas da pesquisa	35
3.2 Diâmetro dos microtubos.....	35
3.3 Diâmetro da linha lateral.....	38
3.4 Determinação do comprimento dos microtubos	39
3.5 Vazão dos microtubos	43
3.6 Pressão no segmento de tubo de derivação	48
3.7 Perda de carga localizada.....	49
3.8 Amostragem de solo	50
3.9 Preparo dos canteiros	51
3.10 Montagem e instalação do sistema de irrigação no campo.....	51
3.11 Ensaios para obtenção da uniformidade de aplicação de água	55
3.12 Condutividade elétrica e pH da água	56
3.13 Implantação da cultura da alface.....	57
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 Diâmetros dos microtubos.....	61
4.2 Diâmetros da linha lateral.....	62
4.3 Comprimento dos microtubos.....	63

4.4 Avaliação hidráulica do sistema.....	66
4.5 Funcionamento do sistema de irrigação com ultra baixa vazão	70
4.6 Uniformidade de distribuição do sistema	72
4.7 Produtividade da cultura da alface.....	73
4.8 Custos do sistema de irrigação.....	74
4.9 Considerações finais.....	76
5 CONCLUSÕES.....	77
ANEXOS.....	83

RESUMO

Desenvolvimento e avaliação de um sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos ramificados

Para o desenvolvimento de uma agricultura sustentável no Brasil é imprescindível realizar investimentos nos setores que desenvolvem tecnologias inovadoras de baixo custo e adaptadas às condições peculiares do país, em substituição a dependência por produtos importados de alto custo e inacessíveis a maioria dos pequenos produtores. Nesse sentido, os emissores do tipo microtubo utilizados em sistemas de microirrigação se apresentam como uma alternativa tecnológica atrativa a essa parcela de produtores, devido o baixo custo de confecção e instalação. Porém, para que sejam atingidas boas uniformidades de aplicação de água é imprescindível que o sistema seja bem dimensionado. Com o objetivo de desenvolver um sistema de irrigação com ultra baixa vazão (UBV) de $0,2 \text{ L h}^{-1}$, utilizando microtubos com derivação e operando em regime laminar, iniciou-se este trabalho buscando irrigação eficiente e de baixo custo em hortas agrícolas. A configuração do sistema proposto consiste em uma linha lateral com diâmetro nominal de 10 mm na qual, os microtubos conectores com diâmetro nominal de 0,8 mm foram diretamente inseridos e, por meio de um segmento de tubo fechado em ambas as extremidades, seis microtubos emissores com diâmetro nominal de 0,7 mm foram acoplados aos conectores. O experimento foi composto de duas etapas. A primeira parte experimental foi conduzida no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP) em Piracicaba – SP, sendo realizada a determinação do diâmetro real dos microtubos, obtenção de modelos matemáticos para dimensionamento do sistema de irrigação e avaliação da vazão observada. A segunda etapa do experimento foi realizada em uma horta localizada na área experimental da ESALQ/USP, onde foram realizados a montagem e instalação do sistema de irrigação, os ensaios para obtenção da uniformidade de aplicação de água e a implantação da cultura da alface em quatro canteiros de 15 m x 1,5 m, onde a água foi fornecida por uma caixa d’água elevada a uma altura de 1,5 m. A uniformidade de aplicação da água foi avaliada por meio do coeficiente de uniformidade estatística e uniformidade de distribuição os quais apresentaram valores iniciais superiores a 90%, sendo considerados excelentes. O sistema de irrigação com ultra baixa vazão proposto apresentou vantagens econômicas para pequenos produtores, devido ao baixo custo de investimento e facilidade de operação do sistema. Entretanto, o sistema apresentou problemas de acúmulos de ar e obstrução de emissores durante o período avaliado, ocasionando a redução da uniformidade de distribuição e da uniformidade estatística sendo, portanto, necessária a realização de mais estudos para obtenção de resultados mais conclusivos.

Palavras-chave: Microirrigação; Uniformidade de distribuição; Baixo custo

ABSTRACT

Development and evaluation of an irrigation system with ultra low flow using microtubes branched

To develop a sustainable agriculture in Brazil is essential to invest in sectors that produce innovative technologies, adapted to Brazilian peculiar conditions and with a low cost, that can replace the dependency on imported products, often not accessible to small producers. In this way, the emitters microtube utilizes in microirrigation can be attractive technological alternative for this kind of farmers, due to the low cost and installation. However, to achieve high uniformity of water application is essential that microirrigation system have to be well designed. This work has to aim to develop an irrigation system with ultra low flow (ULF) of 0.2 L h^{-1} , using microtubes with derivation and operating in laminar flow, this work began searching for efficient irrigation and low-cost vegetable crops. The configuration of the proposed system consists of a lateral line with a nominal diameter of 10 mm in which the microtubes connectors with a nominal diameter of 0.8 mm were inserted directly and through a segment of pipe closed at both ends, six microtubes emitters with a nominal diameter of 0.7 mm were connected to the connectors. The experiment was performed in two steps. The first part of experiment was conducted in the Hydraulics Laboratory, Department of Biosystems Engineering, School of Agriculture "Luiz de Queiroz" (ESALQ / USP) in Piracicaba – SP. It was determined the actual diameter of the microtubes and obtained the mathematical models for irrigation system design and to evaluate the observed discharge. The second part of the experiment was performed in an experimental vegetable garden located in the area of ESALQ / USP. It was realized the assembly and installation of irrigation system, the tests to obtain the uniformity of water application and plantation of lettuce crop into four beds $15 \text{ m} \times 1.5 \text{ m}$, where water was provided by an elevated water tower at a height of 1.5 m. The water application uniformity was evaluated by the statistical coefficient of uniformity and distribution uniformity which it showed initial values above 90% that it is considered excellent. The irrigation system with ultra low flow proposed showed economic advantages for small producers due to low cost and ease of system operation. However, this system presented problems of air accumulation and emitters clogging during the period evaluated, it caused a reduction in uniform distribution and uniform statistics. Therefore, it is necessary to perform further studies to obtain more conclusive results.

Keywords: Microirrigation; Uniform distribution; Low Cost

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquema da coleta de vazão para medição do diâmetro hidráulico	36
Figura 2 - Esquema para determinação do diâmetro da linha lateral	38
Figura 3 - Esquema do sistema de irrigação de ultra baixa vazão (UBV) com derivação, utilizando microtubos.....	39
Figura 4 - Esquema utilizado para determinação dos comprimentos dos microtubos conectores.....	42
Figura 5 - Bancada de testes para determinação da vazão dos microtubos sob pressão de 14,72 kPa (a), sistema de irrigação com derivação (b), vista lateral da bancada (c), reservatório alimentador do sistema (d), recipiente para coleta de vazão (e).	44
Figura 6 - Bancada de testes para determinação da vazão dos microtubos funcionando sob diferentes pressões	45
Figura 7 - Bancada utilizada para visualização da pressão no segmento de tubo de derivação (a), vista detalhada (b) e (c).....	49
Figura 8 - Partes do sistema de irrigação em campo	53
Figura 9 – Esquema da disposição do sistema de irrigação em campo.....	54
Figura 10 - Ensaios para obtenção da uniformidade de aplicação de água (a), distribuição dos recipientes ao longo da linha lateral (b) e detalhe do procedimento da coleta (c)	55
Figura 11 - Cultura da alface (a), vista da linha lateral com derivação (b) e estaca e anel para fixar o microtubo emissor (c)	58
Figura 12 - Curva vazão versus pressão do sistema de irrigação com derivação.....	66
Figura 13 - Relação entre Pst calculado e Pst observado.....	67
Figura 14 - Relação entre Hloc e pressão de entrada.....	68
Figura 15 - Relação entre a constante K e o número de Reynolds	69
Figura 16 – Vista superior do registro 2 no qual passava água com pressão elevada (a), vista dos equipamentos que permitiam a utilização de pressão elevada no início da irrigação (b).....	71

Figura 17 - Produtividade da alface por canteiro	74
--	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação entre microirrigação e irrigação por superfície na Índia	22
Tabela 2 - Critérios para classificação da uniformidade de distribuição (UD)	29
Tabela 3 - Classificação dos emissores quanto ao coeficiente de variação de fabricação	31
Tabela 4 - Valores de coeficiente da cultura (K_c) para três fases de desenvolvimento da cultura da alface após o transplântio das mudas	59
Tabela 5 - Diâmetro interno dos microtubos medidos com o projetor de perfil.....	61
Tabela 6 - Diferenças percentuais entre o diâmetro nominal fornecido pelo fabricante (DN), os valores médios dos diâmetros dos microtubos obtidos hidrodinamicamente (DH) e pelo projetor ótico de perfil (DP)	62
Tabela 7 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo emissor.....	63
Tabela 8 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo conector.....	63
Tabela 9 - Comprimentos dos microtubos conectores utilizados ao longo da linha lateral	65
Tabela 10 - Índice de concordância de Willmott (d), erro quadrado médio (EQM) e erro médio absoluto (EMA) para o modelo I e modelo II.....	70
Tabela 11 - Avaliação da uniformidade do sistema, antes do plantio e depois da colheita da alface.....	73
Tabela 12 - Lista dos componentes utilizados no sistema de irrigação e seus respectivos custos	75

1 INTRODUÇÃO

A importância da irrigação em sistemas agrícolas é claramente percebível por profissionais ligados a área agrária, principalmente possibilitar um aumento na produtividade agrícola no sentido de atender a necessidade crescente de alimentos em função do crescimento demográfico mundial. Desta forma, é de se esperar um aumento de implantação e aperfeiçoamento dos sistemas de irrigação em todo o mundo.

A utilização da irrigação em culturas olerícolas é uma necessidade, mesmo na estação chuvosa, devido à má distribuição das chuvas, haja vista que tais culturas são bastante susceptíveis às deficiências hídricas (TEODORO et al., 1993). As hortaliças compõem um grupo de culturas muito exigentes em água, em que esta constitui mais de 80% do peso das plantas, na maioria das espécies (FILGUEIRA, 2003). Portanto, a irrigação é importante para o aumento da produtividade, além de proporcionar melhoria da qualidade das hortaliças.

O método de irrigação por gotejamento se adapta bem a estas culturas, uma vez que promove grande economia de água e energia (pois a água é aplicada de forma mais localizada e sob baixas pressões), além de melhorar a eficiência nos tratos culturais e necessitar de pouca mão-de-obra. No entanto, para que esse método funcione eficientemente, é imperativo que os sistemas apresentem alta uniformidade de aplicação da água, desse modo, uma vez instalado um projeto de irrigação, é necessário verificar se as condições previstas inicialmente se confirmam em campo (SILVA E SILVA, 2005).

No Brasil há uma deficiência de inovações tecnológicas na microirrigação que proporcione a auto-suficiência de tecnologias com baixo custo adaptadas principalmente ao pequeno produtor. Todavia, a utilização do microtubo é uma alternativa bastante plausível por apresentar baixo custo inicial e operacional, podendo ser utilizado por pequenos produtores. Isso é ainda mais relevante nos países em desenvolvimento, onde a relação custo/benefício na implantação de sistemas de irrigação é elevada em função da importação de tecnologias. Entretanto, devido à falta de informação e aprimoramento técnico, seu emprego foi abandonado por muito tempo.

Apesar do microtubo ter sido precursor na irrigação como gotejador de longo percurso, ainda carece de mais estudos a seu respeito com o objetivo de torná-lo uma tecnologia mais viável tecnicamente e economicamente. Nesse sentido, recentemente, o grupo de pesquisa em hidráulica da ESALQ/USP vem estudando de forma mais sistemática o uso dessa tecnologia. Inicialmente Souza e Botrel (2004) desenvolveram softwares de dimensionamento hidráulico e avaliaram o desempenho da tecnologia na irrigação por gotejamento de hortaliças e fruticultura em condições de regime laminar. Em seguida, Souza (2008) avaliou seu uso em condições de regime turbulento. E com caráter mais inovador Almeida, C., Botrel e Smith (2008); Almeida, A. (2008), utilizaram o microtubo como mecanismo de regulação de pressão em sistemas de microaspersão.

Com a crescente disputa de água e energia elétrica pelos diversos setores produtivos há a necessidade de desenvolvimento de sistemas de irrigação que apliquem água a pequenas vazões, com alta uniformidade e baixo requerimento energético, ou seja, funcione a baixas pressões. Diante do exposto, pretende-se com esta pesquisa, desenvolver e avaliar um sistema de irrigação por gotejamento com ultra baixa vazão (UBV) utilizando microtubos, focando nos seguintes objetivos:

- Desenvolver um sistema de UBV com microtubos de baixo custo e boa eficiência para irrigação;
- Definir as características hidráulicas dos microtubos e desenvolver um modelo matemático para dimensionamento do sistema proposto, com base na relação entre vazão e comprimento dos microtubos para uma dada pressão de entrada;
- Avaliar a uniformidade de aplicação de água pelo sistema proposto a fim de apresentar resultados que motivem os agricultores a adotarem o sistema de irrigação;
- Verificar a viabilidade técnica da utilização de microtubos com derivação em hortas agrícolas.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Agricultura irrigada

No Brasil, a irrigação é utilizada em 3,63 milhões de hectares correspondentes a 5,5% da área cultivada, o que representa em torno de 35% da produção agrícola nacional. No mundo, a irrigação tem proporcionado a produção de 44% dos alimentos consumidos pelo homem em cerca de 18% da área cultivada (SOUZA, 2008).

Entretanto, a irrigação usa aproximadamente 70% das águas retiradas do sistema global de rios, lagos e mananciais subterrâneos. Os outros 30% são consumidos em outros usos, tais como o industrial, municipal, geração de energia, recreação, etc. Estimativas indicam que até o ano 2025 a área irrigada deverá ser expandida entre 20 a 30% para atender a crescente demanda da população (NUNES, 2001).

A agricultura irrigada quando bem manejada, proporciona um aumento na produção de alimentos, além de melhorar a qualidade de vida no meio rural. Porém, se não for realizada de maneira eficiente, pode provocar grandes impactos ambientais, dentre eles: uso inadequado dos recursos hídricos da região, contaminação dos recursos hídricos por produtos químicos, salinização do solo, erosão e consequente assoreamento dos corpos hídricos, entre outros. Portanto, deve-se sempre buscar alternativas tecnológicas aliadas ao manejo tecnicamente planejado, para melhorar e manter a produção de alimentos fazendo uso sustentável dos recursos naturais disponíveis.

O uso da microirrigação tem se tornado um dos métodos de irrigação mais populares, especialmente em áreas onde a água é um recurso escasso. Basicamente consiste na aplicação de água no solo por meio de emissores, em pequenos volumes, porém com alta frequência, visando umedecer apenas uma porção do solo na base da planta, mantendo-o na capacidade de campo ou próximo dela (ALMEIDA, C. 2008), suas aplicações são voltadas principalmente para a fruticultura e horticultura, em culturas de alto retorno econômico e maior dependência hídrica, pois, esses sistemas apresentam alto custo de investimento.

Os sistemas de microirrigação segundo Bernardo, Soares e Mantovani (2006); Vermeiren e Jobling (1997); Daker (1983), apresentam diversas vantagens, tais como: maior eficiência de aplicação de água, uma vez que a irrigação ocorre em apenas uma fração da área cultivada, permitindo um maior controle da lâmina de água aplicada e reduzindo as perdas de água por percolação e evaporação; maior eficiência na adubação, sendo sua aplicação subdividida ao longo de todo o ciclo da cultura, evitando assim processos de lixiviação de nutrientes; não interferem nas práticas culturais, permitindo a fácil movimentação de máquinas e trabalhadores; adaptam-se a diferentes tipos de solo e topografia; redução dos gastos de energia, pois operam com pressões e quantidades menores de água que em outros tipos de irrigação pressurizados; permitem automação, facilitando a operação do sistema quando a mão-de-obra é limitada ou de alto custo.

As principais desvantagens do sistema, de acordo com os mesmos autores, são: problemas de entupimento, devido ao pequeno diâmetro dos orifícios de saída de água; má distribuição do sistema radicular, pois as raízes das plantas tendem a concentrar-se apenas na região umedecida, causando menos firmeza da planta ao solo e criando condições de possíveis tombamentos; custo alto na aquisição, pois, os sistemas de microirrigação são fixos e requerem grande quantidade de tubulações e acessórios.

Na Tabela 1 são apresentados os aumentos na economia de água e produtividades obtidas na Índia (Adaptado de FRAUSTO, 2000).

Tabela 1- Comparação entre microirrigação e irrigação por superfície na Índia

Cultura	Aumento de produtividade	Aumento na eficiência de irrigação
	(%)	(%)
Banana	52	45
Cana-de-açúcar	33	56
Tomate	50	39
Algodão	27	53
Repolho	2	60
Melancia	88	36
Pimentão	44	62

2.2 Uso de microtubos na microirrigação

O microtubo é o mais antigo tipo de gotejador, é também chamado de espaguete e foi um simples e barato emissor muito utilizado em todo mundo no início da microirrigação. Trata-se de um tubo de polietileno de pequeno diâmetro (0,5 – 1,5 mm), cujo comprimento pode ser ajustado de acordo com a pressão no ponto de inserção do microtubo na linha lateral. Os microtubos têm sido utilizados predominantemente como gotejador de longo percurso desde a década de 70 (KENWORTHY, 1972; WU; GITLIN, 1973; BUCKS; MYERS, 1973; KARMELI, 1977; KHATRI et al., 1979; todos citados por ALMEIDA, C., 2008).

As maiores desvantagens dos microtubos são: alta sensibilidade à variação de temperatura e pressão, além da susceptibilidade ao entupimento, sendo este um dos fatores preponderantes para seu desuso ao longo do tempo. Segundo Ishaq e Ibrahim (1995), um entrave técnico para o desenvolvimento desta tecnologia, é a necessidade de um projeto criterioso e detalhado, de forma que a vazão do microtubo seja estimada com precisão. Em consequência, emissores menos exigentes em mão-de-obra na instalação e mais resistentes a danos mecânicos tornaram-se predominantes no mercado.

No entanto, Pizarro Cabello (1996) comenta que na Espanha a popularidade dos microtubos se deve não somente ao seu baixo custo, mas também por uma peculiaridade interessante: o agricultor pode uniformizar as vazões, mesmo depois do sistema instalado, cortando o emissor no comprimento que se mostre adequado. Devido a isto, os microtubos são especialmente indicados para locais onde existem grandes diferenças de pressão devido a desníveis da topografia e a grandes perdas de carga. Ressalta-se que, obter vazão constante ao longo da linha lateral é algo difícil de ser conseguido com os gotejadores, mesmo os autocompensantes. Outro fator que tem influenciado o seu retorno ao mercado da irrigação é o fato da tecnologia de filtragem de água ter evoluído bastante nas últimas décadas.

A implantação de tecnologias de irrigação a baixo custo é fundamental para países em desenvolvimento, onde a utilização de sistemas de irrigação com microtubos é uma boa alternativa para os pequenos agricultores. Com isso, o interesse por

microtubos vem crescendo, principalmente por entidades que prestam assistência técnica a pequenos produtores e comunidades carentes. Souza et al. (2009) avaliaram a viabilidade técnica e o impacto da utilização de kits de irrigação por gravidade com microtubos na melhoria da capacidade de produção agrícola de comunidades no meio rural do Ceará e concluíram que, o kit facilitou o desenvolvimento das atividades agrícolas e, além disso, o sistema de irrigação apresentou um bom desempenho técnico (UD = 87%), em condição de campo, o que demonstrou o seu potencial para a realização de uma irrigação com elevada eficiência de aplicação de água.

No Brasil existe um grande potencial para o desenvolvimento desta técnica, visto que, o país tem um elevado número de pequenos produtores rurais com baixo poder aquisitivo que podem ser beneficiados com o uso de sistema de irrigação utilizando microtubos. No entanto, é necessária a realização de estudos locais, que identifique em quais condições ela pode ser utilizada e quais são as dificuldades técnicas, operacionais e econômicas decorrentes de sua utilização (SOUZA, 2005).

Devido às dificuldades no dimensionamento de projetos de irrigação com microtubos, Pizarro Cabello (1996) recomenda que as características dos microtubos sejam determinadas experimentalmente em laboratório utilizando um modelo adequado de representação da perda de carga no microtubo, conforme a teoria hidráulica. Para tanto, Souza (2005) analisou a técnica de irrigação por gotejamento com microtubos em hortas agrícolas e pomares de frutíferas e concluiu que esta prática é viável tecnicamente devido ao excelente desempenho hidráulico e operação do sistema. Souza, Pérez e Botrel (2006), obtiveram uma uniformidade de distribuição de 97 %, o que indica ótimo desempenho do uso de microtubos como gotejador de longo percurso, de acordo com a classificação proposta por Bralts (1986). Excelentes uniformidades também foram verificadas nos trabalhos de Souza (2008); Almeida, A. (2008); Almeida, C. (2008) que trabalharam com sistema de irrigação utilizando microtubos.

2.3 Hidráulica dos microtubos-gotejadores

O microtubo utilizado na irrigação dissipa energia ao longo de seu comprimento, liberando uma quantidade pequena de água para irrigação (SOUZA; BOTREL, 2004). O

seu comprimento e diâmetro podem ser selecionados para diferentes vazões, possibilitando utilizá-lo como emissor.

Em decorrência do tipo de material utilizado, do diâmetro do tubo, da espessura da parede e da geometria do emissor, torna-se importante analisar as características hidráulicas do emissor, visando fornecer elementos para o projeto e para a operação do sistema de irrigação (FRIZZONE et al. 1998).

O dimensionamento de microtubos é realizado com base no cálculo da perda de carga causada pelo emissor em determinada condição de vazão e pressão, a qual resulta de uma combinação entre perda de carga contínua e localizada e energia de velocidade.

O comprimento do microtubo para uma determinada vazão pode ser calculado pela equação de Darcy-Weisbach ou equação universal de perda de carga eq. (1).

$$hf = f \frac{LV^2}{2gD} \quad (1)$$

em que:

hf = perda de carga no microtubo, m;

f = fator de atrito da fórmula universal, adimensional;

L = comprimento do microtubo, m;

D = diâmetro interno do microtubo, m;

V = velocidade da água no microtubo, m s⁻¹; e

g = aceleração da gravidade, m s⁻².

No caso de regime de escoamento laminar ($NR \leq 2000$), o fator de atrito (f) é calculado pela equação de Hagen-Poiseuille eq. (2).

$$f = \frac{64}{NR} \quad (2)$$

em que:

NR = número de Reynolds, adimensional eq. (3).

$$NR = \frac{V \times D}{\nu} \quad (3)$$

em que:

ν = viscosidade cinemática da água, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$.

A viscosidade cinemática é uma característica do fluido que exerce influência na energia necessária para efetuar o transporte de um líquido pressurizado a um determinado fluxo, e depende da temperatura deste.

A perda de carga localizada e a energia de velocidade podem ser representadas pelas equações a seguir:

$$H_{loc} = K \frac{V^2}{2g} \quad (4)$$

$$EV = \frac{V^2}{2g} \quad (5)$$

em que:

H_{loc} = perda de carga localizada, m.c.a.;

K = coeficiente de perda de carga localizada, adimensional; e

EV = energia de velocidade, m.c.a.

A equação de Darcy-Weisbach é a fórmula universal de cálculo de dissipação de energia dentro de tubulações, podendo ser aplicada para quaisquer situações de transporte de fluido. No entanto, existem diferentes equações que estimam a quantidade de energia dissipada dentro das tubulações, todas, dentro de suas limitações podem fornecer bons resultados, oferecendo até mesmo praticidade nos

cálculos. Porém, sua aplicação se limita às condições para as quais as mesmas foram desenvolvidas.

A influência da temperatura sobre a vazão dos microtubos reduz com o aumento do número de Reynolds (SOARES et al., 1982), conseqüentemente a faixa onde o regime de escoamento é laminar é mais sensível às influências das variações de temperatura na água, bem como da variação de pressão na tubulação. Segundo Parchomchuk (1976 apud OLIVEIRA et al., 2000) mudanças na viscosidade provocadas pela variação da temperatura da água, podem causar variações na vazão dos emissores, maiores que o limite máximo de $\pm 10\%$, caso o regime de escoamento no emissor seja laminar.

Souza (2005) avaliou a influência de diferentes temperaturas da água (15, 25, 30 e 35 °C) no desempenho do sistema de irrigação com microtubos funcionando sob pressão de 100 kPa e concluiu que a cada 5 °C de aumento na temperatura da água, a vazão média aumentou em 5%, porém, mesmo com uma variação de 15 °C na temperatura da água, a uniformidade de distribuição foi superior a 90% e, o coeficiente de variação de vazão só ultrapassou 5% no caso extremo de 35 °C na temperatura da água.

Oliveira (1978) avaliou o efeito da temperatura da água sobre a vazão dos gotejadores Dangotas, Irriga e em microtubos sob pressão constante, concluindo que, em comparação com outros gotejadores, o microtubo estudado obteve menor variação de vazão na linha lateral, desde que sob mesma temperatura, pois a temperatura influenciou sensivelmente a vazão no microtubo.

2.4 Hidráulica de linhas laterais

As linhas laterais são aquelas que alimentam diretamente os emissores e recebem água da linha de derivação. São constituídas de material plástico, PVC ou, mais comumente, o polietileno, de diâmetro interno e espessura de parede variada. Em geral têm-se recomendado laterais com apenas um diâmetro para simplificar a instalação e manutenção.

As linhas laterais estão normalmente dispostas em nível no campo, uma vez que devem acompanhar a linha de plantio. O número de emissores por planta e espaçamento entre eles ao longo da tubulação lateral dependem da vazão do emissor, da capacidade de retenção de água no solo, da determinação do bulbo úmido, do tipo de cultura a ser implantada, da profundidade radicular da cultura, da eficiência de aplicação de água desejada e da variabilidade de vazão do emissor (ASAE EP405.1, 1999). Em se tratando de microtubos, esta variação é bastante reduzida, devido à variação do comprimento do microtubo compensar a variação de pressão ao longo da linha lateral.

A vazão ao longo da linha lateral é variável, pois cada emissor provoca um decréscimo na vazão e consequentemente um decréscimo na perda de carga final (BOTREL, 1984). Assim sendo, para conhecer a perda de carga que ocorre na linha lateral é necessário computar a variação de perda de carga entre cada duas saídas adjacentes, adicionando-a a perda localizada que ocorre no ponto de inserção do microtubo, partindo do final para o início da linha.

2.5 Avaliação de sistemas de microirrigação

Para que a irrigação seja eficiente, é essencial que os sistemas apresentem alta uniformidade de aplicação da água. No sistema de microirrigação, a uniformidade de aplicação d'água ao longo da linha lateral está ligada à variação de vazão dos emissores, que é decorrência das perdas de energia ocasionadas pelo atrito e pelas inserções dos emissores, com a perda ou o ganho de energia devido à topografia do solo, e com a qualidade da matéria-prima e dos processos de fabricação dos emissores (KELLER; KARMELI, 1974).

Diversos coeficientes de uniformidade têm caracterizado a distribuição de aplicação da água em sistemas de irrigação pressurizados. Uma maneira comum de alcançar os parâmetros de comportamento do sistema é por medidas de dispersão, expressando-os de modo adimensional, por meio de comparação com o valor médio.

Um coeficiente muito empregado para representação da uniformidade na microirrigação é a uniformidade de distribuição (UD) apresentada por Keller e Karmeli

(1974). Sua definição encontra-se expressa na eq. (6), fundamentada na razão entre a vazão média do menor quartil e a vazão média de todos os emissores.

$$UD = 100 \cdot \frac{q_n}{\bar{q}} \quad (6)$$

em que:

UD = uniformidade de distribuição, %;

q_n = média de 25% das menores vazões, $L \cdot h^{-1}$; e

$\bar{q}$ = médias de todas as vazões, $L \cdot h^{-1}$

BRALTS, (1986) apresenta os critérios para interpretação dos valores de UD (Tabela 2).

Tabela 2 - Critérios para classificação da uniformidade de distribuição (UD)

UD	Classificação
90% ou mais	Excelente
80 a 90%	Bom
70 a 80%	Regular
Menor que 70%	Ruim

Além da UD outro coeficiente de uniformidade utilizado para a determinação do desempenho do sistema é a uniformidade estatística eq. (7). Favetta e Botrel (2001) recomendam a utilização deste coeficiente na representação da uniformidade de sistemas de microirrigação.

$$U_{est} = 100 \cdot \left(1 - \frac{\sigma}{\bar{q}} \right) \quad (7)$$

em que:

U_{est} = uniformidade estatística, em %; e

σ = desvio padrão das vazões.

Conforme o critério de classificação dos valores de Uest, para sistema de microirrigação, proposto por Bralts (1986), valores igual ou acima de 90% são excelentes, valores entre 80 e 90% são muito bons, valores entre 70 e 80% são regulares, valores entre 60 e 70 % são ruins e valores menores que 60% são inaceitáveis.

De acordo com Keller e Bliesner (1990) sistemas de irrigação por gotejamento convencional em pequenas áreas com topografia uniforme devem ser projetados para ter valores de Uest acima de 88%.

Outro fator que deve ser levado em consideração na avaliação técnica é a variabilidade existente entre os emissores, decorrentes do processo de fabricação do microtubo. Admitindo-se que as variações de vazão causadas pelo processo construtivo têm distribuição normal, é possível utilizar os conceitos de estatística clássica para análises quantitativas (FRIZZONE et al., 1998).

Solomon (1979) propôs, então, um coeficiente de variação de fabricação (CVf), dado pela expressão eq. (8):

$$CVf = \frac{\sigma}{\bar{q}} \quad (8)$$

em que:

CVf = coeficiente de variação de fabricação, adimensional.

Segundo Solomon (1979), o CVf é um importante fator que influencia a uniformidade de emissão da água e a eficiência do sistema de irrigação. Além disso, ele representa uma medida numérica de segurança nos projetos em relação aos gotejadores, cujos valores oscilam entre 2,0 e 10,0%, podendo algumas vezes ser mais elevados. Torna-se importante, portanto, quando se seleciona um emissor, conhecer o CVf, que deve ser fornecido pelo fabricante.

Existem diferentes classificações para emissores quanto ao coeficiente de variação de fabricação: (SOLOMON, 1979; SOIL CONSERVATION SERVICE - USDA,

1979; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT, 1986), como está apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Classificação dos emissores quanto ao coeficiente de variação de fabricação

CVf (%)	Classificação do emissor
SOLOMON (1979)	
0 a 3	Excelente
4 a 7	Média
8 a 10	Marginal
11 a 14	Pobre
Acima de 15	Ruim
SOIL CONSERVATION SERVICE-USDA (1979)	
0 a 3	Excelente
4 a 7	Média
7 a 11	Marginal
11 a 15	Pobre
Acima de 15	Inaceitável
ABNT (1986)	
0 a 10	Boa
10 a 20	Média
20 a 30	Marginal
Acima de 30	Inaceitável

2.6 Modelo matemático na irrigação

Atualmente, o termo modelo matemático é largamente utilizado no ciclo acadêmico, sendo definido por diversos autores. De acordo com Biembengut (1999), o modelo matemático é um conjunto de símbolos e relações matemáticas que traduz, de alguma forma, um fenômeno em questão ou um problema de situação real. O autor afirma que um modelo é oriundo de aproximações desempenhadas para que se possa entender melhor um fenômeno.

O modelo matemático retrata ainda em uma visão simplificada, aspectos da situação pesquisada. Dentre os diversos autores que trabalharam com modelo matemático na área de irrigação temos: Almeida, C. (2008) desenvolveu um modelo para dimensionamento do sistema de irrigação por microaspersão com microtubos, Souza (2008) desenvolveu o modelo matemático WSBOTREL para dimensionamento de microtubos sob regime de escoamento turbulento, Rodrigues (1999) desenvolveu um modelo para dimensionamento e simulação do desempenho de pivô central, Guimarães (1995) elaborou um modelo matemático para dimensionamento e análise de redes hidráulicas em irrigação por aspersão convencional e, Souza (2005) utilizou um modelo matemático para elaboração de um software para dimensionamento de linhas laterais com microtubos em microirrigação.

Segundo Paustian et al. (1992 apud DETOMINI, 2004), existem diversas classificações para diferenciar os modelos. Uma delas os dividem em matemáticos e de simulação. Os modelos matemáticos, simplesmente referentes a representações matemáticas de um fenômeno, podem ser de três tipos: (i) empíricos, baseados em dados puramente observados; (ii) estocásticos, em que o processo é descrito pelas leis de probabilidade e (iii) mecanísticos, que consideram as leis físicas, químicas e biológicas no processo, sendo os mais versáteis dentre os tipos de modelos matemáticos.

Com os avanços tecnológicos, é possível a utilização de métodos computacionais para originar modelos matemáticos que representem as energias dissipadas no processo de condução de um fluido em microtubos, baseando-se nos princípios da hidráulica, em função de experimentos em laboratório e campo, envolvendo pressão e vazão. Segundo Vermeiren e Jobling (1980), a relação entre vazão, comprimento, energia piezométrica e diâmetro interno do microtubo, podem ser representadas em uma só equação.

Uma das equações utilizadas para avaliação do modelo matemático é o Erro Quadrático Médio (EQM) eq. (9).

$$EQM = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (D_{obs} - D_{est})^2}{n} \right]^{0,5} \quad (9)$$

em que:

D_{obs} = dado observado;

D_{est} = dado estimado; e

n = número total de observações.

Segundo Almeida, C. (2008) o cálculo do EQM consiste da média aritmética quadrática dos erros absolutos, a qual tem aplicação quando o sentido do afastamento em torno da média aritmética não é importante.

O modelo matemático pode ainda ser avaliado utilizando o valor do erro médio absoluto (EMA), conforme eq. (10).

$$EMA = \sum_{i=1}^n \frac{(|Ei - Oi|)}{n} \quad (10)$$

em que:

Ei = i-ésima variável estimada; e

Oi = i-ésima variável observada.

O erro sistemático é também um bom indicador numérico da proximidade dos dados observados, dos estimados. O coeficiente de correlação de Willmott (1981) descrito pela eq. (11) é usado como estimador da exatidão dos dados.

$$d = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (Ei - Oi)^2}{\sum_{i=1}^N \left(|Ei - \bar{O}| + |Oi - \bar{O}| \right)^2} \quad (11)$$

em que:

d = Índice de concordância de Willmott; e

$\bar{O}$ = média das variáveis observadas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e etapas da pesquisa

A condução desta pesquisa dividiu-se em duas etapas: a primeira consistiu na determinação do diâmetro real dos microtubos, obtenção do modelo matemático para dimensionamento de microtubos e avaliação da vazão observada, realizados no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” /USP, situada no município de Piracicaba - SP a 22°42' de latitude Sul; 47°30' de longitude Oeste e aproximadamente 546 metros de altitude. A segunda etapa foi composta pela montagem, instalação do sistema de irrigação com ultra baixa vazão, avaliação do sistema de irrigação e implantação da cultura da alface em quatro canteiros situados na área experimental do mesmo departamento.

3.2 Diâmetro dos microtubos

Avaliaram-se os microtubos de cor verde, amarelo, laranja e azul, fabricados pela empresa Plasnova Louveira Ind. Com. Ltda com diâmetros nominais de 0,6, 0,7, 0,8 e 1,0 mm, respectivamente, e diâmetros externos de 2,5 mm. A determinação do diâmetro interno do microtubo foi realizada por meio de medições hidráulicas em laboratório e pelo projetor ótico de perfil.

Pelo método hidráulico, o diâmetro de cada microtubo foi determinado utilizando-se dados de dois comprimentos de microtubos: 5 e 15 m, submetidos a uma pressão constante de 12,4 kPa. Os comprimentos foram escolhidos na fase preliminar dos testes, levando-se em consideração os comprimentos que reduziriam os efeitos da perda de carga localizada na entrada do microtubo, de tal modo que a mesma não fosse importante na determinação do diâmetro. A pressão de operação foi estimada com base na diferença de nível entre o início e o final do microtubo (Figura 1).

Figura 1 - Esquema da coleta de vazão para medição do diâmetro hidráulico
Fonte: Almeida, C. 2008

Por meio da força da gravidade, a água presente no reservatório superior foi conduzida pelo microtubo para o reservatório inferior de peso conhecido, destinado à coleta de água durante um determinado intervalo de tempo, e pesado posteriormente em uma balança analítica. O volume da água foi calculado considerando o peso e a densidade da água na temperatura monitorada, sendo a vazão determinada pela razão entre o volume e o tempo em que a água foi coletada.

Para cada microtubo e comprimento, foram realizadas três repetições, sendo que, em cada volume coletado, mediu-se a temperatura da água para cálculo de sua viscosidade cinemática. A necessidade desta medida deve-se ao fato do escoamento sob regime laminar ser bastante sensível à variação da viscosidade da água, a qual é influenciada pela variação da temperatura.

Na determinação hidrodinâmica, o diâmetro foi calculado por meio de dados obtidos em ensaio sob regime laminar, aplicados na equação de Darcy-Weisbach eq. (1) e na equação da energia de velocidade eq. (5). Assim, o diâmetro interno resultou de uma equação que expressa a dissipação de energia ao longo do microtubo (equação

universal de dissipação de energia) e a energia dissipada na saída do microtubo em função da vazão. A eq. (12) representa o diâmetro em função das variáveis dependentes.

$$D = \left(\frac{0,08262647 \cdot Q^2 + 4,153269 \cdot \mu L Q}{Z} \right)^{0,25} \quad (12)$$

em que:

D = diâmetro interno do microtubo, m;

Q = vazão no microtubo, $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$;

μ = viscosidade cinemática, $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$;

Z = carga potencial, m; e

L = comprimento do microtubo, m.

Substituindo na eq. (12) os valores de vazão (Q), de carga potencial (Z) e comprimento do microtubo (L), obtidos nos ensaios esquematizados na Figura 1, calculou-se o diâmetro interno do microtubo pelo método hidrodinâmico.

Na determinação ótica do diâmetro, utilizou-se o projetor ótico de perfil, de fabricação da Starrett Precision Optical, modelo HB400-2. Este equipamento permite aferir em escalas digitais com resolução de 0,001 mm o diâmetro do microtubo, na condição de pressão hidrostática nula. A determinação do diâmetro no projetor ótico de perfil foi realizada com cinco anéis de cada microtubo com 4 mm de comprimento, aproximadamente. O valor médio destas leituras foi utilizado posteriormente para efeito de comparação entre o diâmetro determinado hidrodinamicamente e aquele fornecido pelo fabricante, o qual foi denominado de diâmetro nominal (DN).

3.3 Diâmetro da linha lateral

Para a determinação do diâmetro interno médio da linha lateral foi utilizado um segmento deste tubo feito de polietileno com 23 cm de comprimento, o qual uma de suas extremidades foi vedada e presa em um material rígido, disposto horizontalmente funcionando como um suporte, deixando o tubo na vertical (Figura 2).

Figura 2 - Esquema para determinação do diâmetro da linha lateral

No início do ensaio o material (suporte + segmento do tubo) foi pesado em uma balança digital com precisão de 0,01g, em seguida, com o auxílio de uma pipeta foi colocada água destilada no interior do segmento do tubo e o material foi pesado novamente. Realizou-se o monitoramento da temperatura da água a fim de obter o valor do peso específico da mesma. Foi utilizado o volume presente no interior do tubo para a determinação do diâmetro interno da linha lateral o qual foi obtido por meio da eq. (13), assumindo-se a geometria interna do tubo como cilíndrica. Este ensaio foi repetido cinco vezes.

$$D_{LL} = \sqrt{\left(\frac{4Vol}{\pi \cdot h}\right)} \quad (13)$$

em que:

D_{LL} = diâmetro da linha lateral, m

Vol = volume de água destilada contida no tubo, m³; e

h = comprimento do segmento do tubo, m.

3.4 Determinação do comprimento dos microtubos

A configuração do sistema proposto consistiu em uma linha lateral com diâmetro nominal de 10 mm na qual os microtubos conectores de comprimentos variáveis (visando compensar a perda de carga ao longo da linha) foram diretamente inseridos e, por meio de um segmento de tubo de derivação fechado em ambas as extremidades, seis microtubos emissores foram acoplados aos conectores. As extremidades do segmento de tubo de derivação foram aquecidas e prensadas para garantir uma completa vedação (Figura 3).

Figura 3 - Esquema do sistema de irrigação de ultra baixa vazão (UBV) com derivação, utilizando microtubos

No desenvolvimento do modelo para o dimensionamento do emissor proposto, assumiu-se que os diâmetros internos dos microtubos foram aqueles determinados hidrodinamicamente em laboratório para obtenção do valor real, aumentando a precisão dos cálculos.

Neste experimento foram utilizados microtubos de polietileno, fabricados para uso em irrigação pela empresa Plasnova, com diâmetro nominal de 0,7 mm para microtubos emissores e 0,8 mm para microtubos conectores.

Inicialmente foi realizado o cálculo para os conectores e emissores que seriam utilizados no ensaio realizado no laboratório. Para isto, uma planilha do software Office Microsoft Excel foi elaborada para estimar o comprimento dos microtubos em função da pressão, do diâmetro e da vazão. Para calcular o comprimento do microtubo foram admitidos os seguintes valores inicialmente propostos no projeto: vazão de $0,2 \text{ L h}^{-1}$ para o microtubo emissor e de $1,2 \text{ L h}^{-1}$ para microtubo conector, viscosidade de $1,01 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$ para uma temperatura de 20°C , pressão de alimentação de 1,5 m.c.a que corresponde a 14,7 kPa e pressão no segmento de tubo de derivação de 0,3 m.c.a a qual corresponde a 2,94 kPa.

O número de Reynolds e o fator f foram calculados por meio da eq. (3) e (2) respectivamente. Para o cálculo da perda de carga unitária foi utilizada a eq. (14). No cálculo da perda de carga no microtubo emissor utilizou-se a equação de Bernoulli eq. (15). O comprimento do microtubo conector e emissor foi calculado dividindo a perda de carga (h_f) pela perda de carga unitária (J) do microtubo.

Subtraindo a pressão no segmento de tubo de derivação (P_{st}) da pressão na entrada do microtubo conector (P_e), calculou-se a perda de carga no microtubo conector.

$$J = f \frac{V^2}{D2g} \quad (14)$$

em que:

J = perda de carga unitária, m m^{-1} .

$$\frac{P_1}{\gamma} + \frac{V_1^2}{2g} + Z_1 = \frac{P_2}{\gamma} + \frac{V_2^2}{2g} + Z_2 + hf \quad (15)$$

em que:

$\frac{P}{\gamma}$ = carga de pressão, m;

$\frac{V^2}{2g}$ = carga cinética, m; e

Z = carga potencial, m.

O dimensionamento do sistema de irrigação utilizado na área experimental do Departamento de Engenharia de Biosistemas foi realizado a partir do ponto final da linha lateral (onde estava inserido o microtubo conector de número 1) e prosseguiu até o ponto inicial (onde estava inserido o microtubo conector de número 16), ou seja, iniciou-se do final para o início da linha lateral (Figura 4). O valor da pressão no final da linha lateral foi determinado pelo método da tentativa, em que foram admitidos diferentes valores até a pressão no início da linha atingir seu valor previamente definido.

Para este dimensionamento, levou-se também em consideração todos os parâmetros descritos anteriormente para o cálculo do comprimento do microtubo conector utilizado em laboratório, porém, devido à variação da perda de carga ao longo da tubulação, foi necessário o cálculo do comprimento do microtubo conector em cada ponto de sua conexão com a linha lateral.

Figura 4 - Esquema utilizado para determinação dos comprimentos dos microtubos conectores

3.5 Vazão dos microtubos

No Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, montaram-se duas bancadas de testes. A primeira foi montada para funcionar a uma pressão de 14,7 kPa, composta por um filtro de disco de 120 mesh, uma caixa d'água que proporciona uma pressão máxima de 147,2 kPa, um reservatório para abastecimento d'água, um piezômetro e dois registros, um para controlar a entrada de água no reservatório e outro para controlar a entrada de água no sistema de irrigação (Figura 5).

A água proveniente da caixa d'água passava pelo filtro de disco e por um registro agulha para depois abastecer o reservatório, o qual possuía um dreno utilizado para eliminar o excesso de água recebida da caixa d'água mantendo o nível constante. Do reservatório saía um tubo alimentador do sistema em que, a água antes de atingir a tubulação de polietileno, foi regulada por um registro que permitia a sua entrada para o sistema de irrigação. A bancada foi constituída de uma linha lateral com diâmetro interno de 13 mm, três microtubos conectores dos quais derivaram os microtubos emissores. O piezômetro instalado no início da tubulação foi utilizado para monitorar a pressão de alimentação da lateral.

A distância entre conexões dos microtubos conectores foi de aproximadamente 25 cm, visando evitar a influência de causas perturbadoras no escoamento. Durante os ensaios, três microtubos conectores foram colocados em funcionamento simultaneamente. A água foi coletada em aproximadamente 60 minutos. Vale salientar que devido ao fato de que a vazão foi determinada por pesagens, todos os recipientes foram pesados antes do início de cada ensaio.

Figura 5 - Bancada de testes para determinação da vazão dos microtubos sob pressão de 14,72 kPa (a), sistema de irrigação com derivação (b), vista lateral da bancada (c), reservatório alimentador do sistema (d), recipiente para coleta de vazão (e)

Na segunda bancada de ensaios o abastecimento de água para o sistema ocorreu por meio de uma caixa d'água que proporcionou uma pressão máxima de 147,2 kPa. Os microtubos utilizados na primeira bancada de testes foram novamente utilizados na segunda bancada, sendo dessa vez, ensaiados sob pressões de 18,6; 39,2 e 58,9 kPa.

A regulagem das pressões se deu por meio de um registro regulador da entrada de água para o sistema e as mesmas foram medidas por meio de um manômetro digital instalado no início da tubulação (Figura 6).

Figura 6 - Bancada de testes para determinação da vazão dos microtubos funcionando sob diferentes pressões

É importante ressaltar que não foi possível utilizar a pressão de 14,7 kPa nesta configuração, devido à elevada instabilidade apresentada no momento da leitura no manômetro para pressões inferiores a 18,6 kPa. A água foi coletada em aproximadamente 50, 45 e 30 minutos para as pressões de 18,6; 39,2 e 58,9 kPa respectivamente.

Em ambos ensaios se obteve o valor médio da vazão o qual foi resultante dos valores médios de três repetições para cada pressão avaliada. Após cada coleta, os recipientes com água foram pesados em balança de precisão de 0,01g, sendo o peso transformado em volume ao dividi-lo pelo peso específico da água. A temperatura da água foi monitorada a fim de obter os valores da viscosidade cinemática e do peso específico da água. As vazões foram determinadas mediante a razão entre o volume e o tempo de cada coleta.

Para verificar se a vazão observada em laboratório estava de acordo com o previsto, realizou-se a determinação da vazão calculada, a qual foi comparada com a vazão determinada em laboratório. Para isto, considerou-se a perda de carga no microtubo conector, a perda de carga do microtubo emissor e a pressão na entrada do microtubo conector (ponto de inserção do microtubo na linha lateral).

Além disso, outros parâmetros foram utilizados para a determinação da vazão calculada, tais como: o diâmetro do microtubo emissor, o diâmetro do microtubo conector, o comprimento dos microtubos e os fatores de atrito.

Pode-se observar que a vazão no microtubo conector é igual ao somatório das vazões presentes nos microtubos emissores eq. (16).

$$Q_c = n \cdot q_e \quad (16)$$

em que:

n = número de microtubos emissores;

q_e = vazão no microtubo emissor; e

Q_c = vazão no microtubo conector.

A pressão na entrada do microtubo conector foi determinada utilizando a eq. (17):

$$P_e = hf_c + hf_e \quad (17)$$

em que:

P_e = pressão na entrada do microtubo conector;

hf_c = perda de carga no microtubo conector; e

hf_e = perda de carga no microtubo emissor.

Substituindo a equação universal de perda de carga eq. (1) na equação 17 e realizando as devidas simplificações, determinou-se a eq. (18):

$$q_e = \sqrt{\frac{\pi^2 g P_e (D_c^5 D_e^5)}{8(n^2 D_e^5 L_c f_c + D_c^5 L_e f_e)}} \quad (18)$$

em que:

q_e = vazão no microtubo emissor;

D_c = diâmetro do microtubo conector;

D_e = diâmetro do microtubo emissor;

L_c = comprimento do microtubo conector;

L_e = comprimento do microtubo emissor;

f_c = fator de atrito do microtubo conector; e

f_e = fator de atrito do microtubo emissor.

Nota-se que esta é uma equação implícita, pois, para determinar o fator de atrito (f) é necessário saber a vazão, ou seja, o parâmetro (q_e) está presente no primeiro e segundo membro da equação, de forma direta e indireta respectivamente, sem possibilidade de ser explicitada em relação aos demais parâmetros, necessitando-se de um processo iterativo para sua resolução. A demonstração detalhada da equação acima pode ser visualizada no anexo A.

A comparação entre os valores de vazão medidas empiricamente (Q_{obs}) e calculadas (Q_{calc}) foi verificada se aplicando o Erro Quadrático Médio (EQM) eq. (19).

$$EQM = \sqrt{\frac{\sum (Q_{obs} - Q_{calc})^2}{n}} \quad (19)$$

em que:

Q_{obs} = vazão observada;

Q_{calc} = vazão calculada;

n = número total de observações.

Qualquer variação na vazão dos emissores na área do projeto pode afetar a lâmina aplicada às plantas. Um fator que deve ser considerado na avaliação dos microtubos é a variabilidade existente entre os emissores, decorrentes do processo de fabricação dos mesmos. Dessa forma, determinou-se o coeficiente de variação de fabricação (CVf) do emissor com base na eq. (8). Monitorou-se a pressão e a temperatura da água a fim de garantir que as condições de ensaio estavam sendo mantidas durante a realização do mesmo.

3.6 Pressão no segmento de tubo de derivação

Apesar de a pressão no segmento de tubo de derivação (P_{st}) ter sido pré-estabelecida para uma pressão de 2,94 kPa foi importante verificar se a pressão admitida estava ocorrendo de fato. Então, utilizaram-se os ensaios realizados na primeira e segunda bancada para observar a (P_{st}). Para esta verificação, realizou-se um furo no segmento de tubo de derivação no qual foi introduzido um microtubo que, por meio de um adaptador, ligou-se a um tubo de diâmetro maior. Este último foi conectado a um piezômetro utilizado no monitoramento da pressão no segmento de tubo de derivação (Figura 7). A leitura neste equipamento foi realizada três vezes para cada pressão.

Com base na equação de Bernoulli eq. (15) foi calculada a pressão no segmento de tubo de derivação eq. (20).

$$P_{st} = P_e - hf_c \quad (20)$$

em que:

P_{st} = pressão no segmento de tubo de derivação.

A pressão observada no segmento de tubo de derivação foi comparada com a calculada.

Figura 7 - Bancada utilizada para visualização da pressão no segmento de tubo de derivação (a), vista detalhada (b) e (c)

3.7 Perda de carga localizada

Com base nas análises realizadas em laboratório foi verificada a existência de perda de carga localizada, ocasionada pelo ponto de inserção do microtubo conector na linha lateral e no segmento de tubo de derivação, a qual precisou ser incluída nos

cálculos para o dimensionamento do sistema de irrigação. Para o cálculo da perda de carga localizada foi utilizada a eq. (21).

$$H_{loc} = Pst_{calc} - Pst_{obs} \quad (21)$$

em que:

H_{loc} = perda de carga localizada, m.c.a.;

Pst_{calc} = pressão no segmento de tubo de derivação calculada, m.c.a.; e

Pst_{obs} = pressão no segmento de tubo de derivação observada, m.c.a.;

Após ter sido realizado o cálculo da H_{loc} , determinou-se o coeficiente de perda de carga localizada eq. (22).

$$K = H_{loc} \frac{2g}{V^2} \quad (22)$$

Após a determinação de K , realizou-se o ajuste no comprimento do microtubo conector apenas para a pressão de 14,7 kPa a qual foi utilizada para alimentação do sistema de irrigação em campo.

Diante do exposto, elaboraram-se dois modelos matemáticos, no qual um desconsiderava a perda de carga localizada (modelo I) e o outro (modelo II) a considerava. Posteriormente, o desempenho dos dois modelos foi comparado mediante avaliação da vazão dos gotejadores.

Após a realização do dimensionamento do sistema de irrigação foi inicializada a segunda etapa do experimento.

3.8 Amostragem de solo

Para que a cultura da alface (*Lactuca sativa*) fosse implantada com sucesso, necessitou-se previamente realizar um estudo do solo no qual a mesma seria cultivada, ou seja, foi feita a amostragem de solo para avaliação da fertilidade.

Antes da coleta de solo, teve-se o cuidado de limpar com a enxada a superfície do terreno nos locais escolhidos para retirar as amostras simples, removendo resíduos não decompostos de tecido vegetal, folhas, talos, pedras; tomando-se a devida cautela para não remover a parte superficial do solo.

Foram coletadas amostras de solos em quatro canteiros com o auxílio de uma pá reta, pelo método de ziguezague. Os pontos de coleta das amostras foram determinados ao acaso, sendo a profundidade de amostragem de 20 cm a partir da superfície do solo. Com a finalidade de garantir a representatividade, as amostras simples foram transformadas em amostras compostas, uma para cada canteiro, oriunda da homogeneização das amostras simples, em um balde plástico previamente limpo. Posteriormente, cada amostra foi ensacada, identificada e submetida para análise no Laboratório de Solos, localizado no Departamento de Ciência do Solo da ESALQ/USP.

3.9 Preparo dos canteiros

Com o auxílio de uma enxada foi realizada a capina do solo, seguida do revolvimento e destorroamento do mesmo com o uso do enxadão. Posteriormente, realizou-se o nivelamento da superfície de cada canteiro com dimensões de 1,5 m x 15 m. Com base no resultado da análise de solo, foi realizada a calagem nos quatros canteiros com o objetivo de elevar a saturação por base (V), uma vez que a cultura da alface requer pH entre 6,0 e 6,8 e V maior que 80% (RAIJ et al., 1996). O calcário dolomítico foi aplicado a lanço e depois incorporado ao solo. Esse procedimento ocorreu dois meses antes do transplântio das mudas.

3.10 Montagem e instalação do sistema de irrigação no campo

Após o dimensionamento do sistema de irrigação, iniciou-se a construção da parte estrutural do mesmo e em seguida a instalação deste na área experimental. O sistema foi composto por uma caixa d'água elevada a uma altura de 1,5 m acima do nível do canteiro, utilizada para irrigar quatro canteiros; um registro tipo esfera para abrir e fechar o sistema; uma bóia eletrônica desenvolvida para esse experimento; uma válvula solenóide que regulava a entrada de água para a caixa d'água; um filtro de tela

de 155 mesh; e o sistema de irrigação com microtubos (Figura 8). Na linha principal foi empregado tubo PVC de 25 mm e nas linhas laterais foram utilizados tubos de polietileno com diâmetro nominal de 10 mm.

Para inserção dos microtubos conectores na linha lateral foram realizados furos de 2 mm com uma furadeira de bancada. O diâmetro desse furo foi estabelecido para evitar a ocorrência de vazamentos, uma vez que o diâmetro externo dos microtubos era de 2,5 mm.

Levou-se em consideração no planejamento e implantação do sistema alguns requisitos técnicos, visando o sucesso deste sistema de irrigação de baixo custo com ultra baixa vazão (UBV) para pequenos produtores:

- O sistema deve ser constituído de componentes de fácil aquisição e montagem, possibilitando que as operações de montagem e manutenção fossem feitas pelo próprio usuário;
- O sistema deve fornecer uma alta uniformidade de aplicação;
- O sistema deve apresentar boa eficiência de irrigação.

Figura 8 - Partes do sistema de irrigação em campo

A disposição do sistema de irrigação em campo pode ser visualizada na Figura 9.

Figura 9 – Esquema da disposição do sistema de irrigação em campo

O desenho esquemático do sistema de irrigação com derivação, vista lateralmente, encontra-se no anexo B.

3.11 Ensaios para obtenção da uniformidade de aplicação de água

Para a verificação da viabilidade técnica do sistema foram avaliados os seguintes parâmetros: uniformidade de distribuição (UD) e uniformidade estatística (Uest) antes do plantio e depois da colheita da alface (Figura 10).

Figura 10 - Ensaios para obtenção da uniformidade de aplicação de água (a), distribuição dos recipientes ao longo da linha lateral (b) e detalhe do procedimento da coleta (c)

A determinação da uniformidade da vazão ao longo das quatro linhas laterais instaladas nos canteiros foi realizada por meio da coleta da vazão em 32 emissores de cada linha lateral, ou seja, para cada derivação (com seis emissores) um emissor foi escolhido, totalizando 128 emissores avaliados. Para isto, o microtubo emissor foi desconectado da haste de fixação ao solo e inserido dentro do coletor (Figura 10c). Devido à ultra baixa vazão (UBV) deste emissor, cada ensaio teve a duração de aproximadamente uma hora, assim, conseguiu-se um volume que possibilitasse avaliação do desempenho do sistema de irrigação.

Para melhor avaliação, foram feitas três repetições dos ensaios de desempenho do sistema. O volume coletado em cada recipiente foi determinado ao final do ensaio, utilizando-se de proveta com precisão de $1,0 \text{ cm}^3$. A uniformidade de distribuição (UD) e a uniformidade estatística (Uest) foram determinados com base nas equações 6 e 7 respectivamente.

3.12 Condutividade elétrica e pH da água

Realizou-se a coleta da água utilizada para irrigação, sendo em seguida levada ao Laboratório de Física de Solo e Qualidade de Água pertencente ao Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, para determinação da condutividade elétrica (CE) e do pH (potencial hidrogeniônico). A medida da condutividade elétrica foi realizada com a utilização de um condutivímetro da marca Digimed, com precisão de $\pm 1\%$. O pH da água foi determinado utilizando um sensor de pH da marca Digimed.

Avaliou-se, preliminarmente, a condutividade elétrica da água presente no reservatório de abastecimento da área experimental, verificando-se que a mesma era classificada como C2, ou seja, água com salinidade média ($0,25 - 0,75 \text{ dS m}^{-1}$, a 25°C). Os valores observados se encontravam abaixo de $0,9 \text{ dS m}^{-1}$, que se trata do valor limite recomendado por Ayers e Westcot (1985) para que possibilite a obtenção da máxima produção pela cultura da alface.

Adicionalmente, verificou-se os valores de pH para as mesmas amostras coletadas na avaliação preliminar da condutividade elétrica. Constatou-se que as amostras possuíam o pH na faixa de 6,5 a 8,4, sendo este intervalo considerado

adequado para irrigação. Segundo Ayers e Westcot (1985), valores de pH fora desta faixa podem provocar deterioração de equipamentos de irrigação.

3.13 Implantação da cultura da alface

Na etapa de campo foi implantado o cultivo da alface (*Lactuca sativa*) variedade “crespa” com espaçamento de 0,3 x 0,3 m em quatro canteiros de 1,50 x 15 m existentes na área experimental do Departamento de Engenharia de Biossistemas da ESALQ/USP, onde a água foi fornecida de uma caixa d’água elevada a uma altura de 1,5 m e distribuída por gravidade para a cultura por meio dos microtubos.

As mudas foram produzidas por um viveirista da região de Piracicaba em bandejas de isopor de 12 x 24 células, totalizando 768 mudas transplantadas com cerca de um mês após a semeadura e possuindo 2 a 3 pares de folhas (Figura 11a). O transplântio foi realizado no dia 30 de junho de 2010 sendo que, para cada alface, foi instalado um microtubo emissor (Figura 11b). Com o objetivo de evitar a ocorrência de jatos d’água, colocou-se um anel de polietileno na ponta de cada microtubo e, para melhorar a sua fixação foram colocadas pequenas estacas plásticas (Figura 11c).

A adubação de pré-plantio foi feita com 65 t ha⁻¹ de esterco. Realizou-se duas aplicações em cobertura de 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio aos 7 e 15 dias após o transplântio das mudas. Foi realizada o controle de ervas invasoras por meio de capina manual, buscando sempre deixar as plantas de alface livres de plantas invasoras.

Figura 11 - Cultura da alface (a), vista da linha lateral com derivação (b) e estaca e anel para fixar o microtubo emissor (c)

O manejo da irrigação foi realizado com base nos dados da estação meteorológica da ESALQ/USP. Para a estimativa da evapotranspiração de referência (E_{to}), utilizou-se o método de Penman-Monteith FAO.

O valor de K_c foi obtido para cada período vegetativo de acordo com a Tabela 4.

Tabela 4 - Valores de coeficiente da cultura (Kc) para três fases de desenvolvimento da cultura da alface após o transplântio das mudas

Fases	Kc
II	0,48
III	0,80
IV	0,88

Fase II – do transplântio aos 16 dias seguintes;

Fase III – do final da segunda fase aos 37 dias após o transplântio;

Fase IV – do final da terceira fase até a colheita.

Fonte: Gomes (2001).

A colheita das alfaces foi realizada no dia 18 de agosto de 2010 quando as mesmas apresentavam-se prontas para o consumo. Imediatamente após a colheita, foram obtidos pesos úmidos da parte aérea de 20 alfaces por canteiro, escolhidas ao acaso, para quantificação da produtividade. Essa determinação foi realizada por meio de pesagem em balança digital. Ressalta-se que, apesar da produtividade não depender exclusivamente da irrigação, é uma informação necessária para a avaliação qualitativa do desempenho do sistema.

Com o objetivo de difundir esta técnica entre pequenos produtores, apresentou-se o custo de investimento do sistema de irrigação proposto. Este custo foi comparado ao de um kit de irrigação por gotejamento para agricultura familiar, disponível no mercado, no qual se utiliza tubos gotejadores ao invés de microtubos. A cotação deste kit foi realizada com uma empresa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Diâmetros dos microtubos

Os resultados obtidos no ensaio hidrodinâmico foram 0,762; 0,695; 0,887 e 1,100 mm para os diâmetros nominais fornecidos pelo fabricante de 0,6; 0,7; 0,8 e 1,0 mm respectivamente.

As medidas dos diâmetros dos microtubos, obtidas por meio do projetor ótico de perfil, são apresentadas na Tabela 5. Verifica-se que os valores médios dos diâmetros determinados pelo método hidráulico e pelo projetor ótico de perfil foram bastante semelhantes. Em trabalhos realizados por Souza (2005), o autor comenta que o diâmetro medido em função de avaliações hidráulicas é mais representativo em relação ao valor apresentado pelo projetor de perfil. Isso ocorre, principalmente, pelo fato do comprimento do microtubo utilizado para determinação do diâmetro interno ser maior quando se utiliza o método hidráulico.

Souza e Botrel (2004) avaliaram os diâmetros de quatro microtubos no projetor de perfil e encontraram valores diferentes dos observados neste trabalho (0,679; 0,695; 0,820 e 1,024 mm). Almeida, C. (2008) realizou o mesmo estudo e encontrou valores de diâmetro interno de 0,617; 0,698; 0,890 e 1,072 mm. Isto mostra que é necessária a determinação real dos diâmetros internos para se obter maior precisão no dimensionamento de sistemas de irrigação utilizando microtubos.

Tabela 5 - Diâmetro interno dos microtubos medidos com o projetor de perfil

	Microtubos			
	Amarelo	Verde	Laranja	Azul
Média	0,762	0,696	0,887	1,097
DP	0,003	0,012	0,005	0,028
CV(%)	0,415	1,709	0,607	2,524

As diferenças percentuais entre o diâmetro nominal fornecido pelo fabricante (DN), os valores médios dos diâmetros dos microtubos obtidos hidrodinamicamente (DH) e pelo projetor ótico de perfil (DP) estão apresentadas na Tabela 6. Observa-se que a maior diferença no valor do diâmetro foi de -27,00 %, quando se comparou o

diâmetro nominal com o valor médio obtido hidrodinamicamente e, quando o DN foi comparado com o valor médio do projetor ótico de perfil. Além disso, o microtubo amarelo o qual deveria ter DN de 0,6 mm apresentou valor de 0,762 mm tanto no ensaio hidrodinâmico quanto pelo projetor ótico de perfil, ou seja, um valor bem superior ao estabelecido pelo fabricante, ultrapassando o valor do microtubo de cor verde o qual possui diâmetro nominal de 0,7 mm. Nos ensaios hidrodinâmico e pelo projetor de perfil para esse microtubo, obteve-se os diâmetros de 0,695 e 0,696 respectivamente, em que a diferença verificada entre essas medidas foi de -0,14%. Observou-se que as menores diferenças percentuais foram verificadas entre DH e DP.

Tabela 6 - Diferenças percentuais entre o diâmetro nominal fornecido pelo fabricante (DN), os valores médios dos diâmetros dos microtubos obtidos hidrodinamicamente (DH) e pelo projetor ótico de perfil (DP)

DN	Diferença %		
	(DN-DH)/DN	(DN-DP)/DN	(DH-DP)/DH
0,6	-27,00	-27,00	0,00
0,7	0,71	0,57	-0,14
0,8	-10,88	-10,88	0,00
1,0	-10,00	-9,70	0,27

DN: diâmetro nominal fornecido pelo fabricante; DH: diâmetro determinado hidrodinamicamente e DP: diâmetro obtido no projetor ótico de perfil.

4.2 Diâmetros da linha lateral

O diâmetro médio da linha lateral resultante de cinco repetições foi de 9,96 mm, diferenciando do diâmetro nominal (10 mm) em 0,4 % a menos. O resultado foi bem próximo ao diâmetro fornecido pelo fabricante. Almeida, C. (2008) também realizou ensaios para determinação do diâmetro real da linha lateral para irrigação e concluiu que, o valor do diâmetro interno real dos tubos usados na linha lateral de irrigação deve ser determinado hidraulicamente para elevar a precisão do seu dimensionamento, pois, o comprimento permitido para a linha lateral está relacionado ao seu diâmetro.

4.3 Comprimento dos microtubos

Os resultados da planilha do Microsoft Excel para o cálculo do comprimento do microtubo emissor e do conector podem ser visualizados nas Tabela 7 e 8, respectivamente. Estes dados são a base dos ensaios realizados em laboratório, visando obter a relação entre pressão e vazão.

Tabela 7 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo emissor

Microtubo emissor								
ND	Vazão* (L h ⁻¹)	Diâmetro (mm)	NR	f	J (m m ⁻¹)	Pst* (kPa)	hf (m)	L _e (m)
6	0,2	0,695	100,77	0,635	0,999	2,94	0,299	0,30

ND: número de derivações; NR: número de Reynolds; f: fator de atrito; J: perda de carga unitária; Pst: pressão no segmento de tubo de derivação; hf : perda de carga; L_e: comprimento do microtubo emissor.

* Valores predefinidos

O comprimento do microtubo conector foi calculado para testes em laboratório, pois, em campo, seu comprimento foi variável devido às perdas de carga que ocorrem ao longo da linha lateral (Tabela 8).

Tabela 8 - Parâmetros utilizados para determinação do comprimento do microtubo conector

Microtubo conector							
Vazão* (L h ⁻¹)	Diâmetro (mm)	NR	f	J (m m ⁻¹)	P _e * (kPa)	hf (m)	L _c (m)
1,2	0,887	473,74	0,135	2,259	14,7	1,2	0,53

NR: número de Reynolds; f: fator de atrito; J: perda de carga unitária; P_e: pressão na entrada do microtubo conector; hf : perda de carga; L_c: comprimento do microtubo conector.

* Valores predefinidos

Para que a vazão em campo fosse o mais próximo possível de 0,2 L h⁻¹, foi necessário reduzir no comprimento do microtubo devido à perda de carga localizada. Por conseguinte, o comprimento deste microtubo conector que antes era de 53,0 passou a ser de 38,7 cm.

Os modelos teóricos utilizados no cálculo do comprimento do microtubo conector estão descritos na eq. (23) e eq. (24) respectivamente.

$$L_c = \left(\frac{P_{ei} - P_{st}}{J} \right) \cdot 100 \quad (23)$$

$$L_c = \left(\frac{P_{ei} - P_{st} - H_{loc}}{J} \right) \cdot 100 \quad (24)$$

$$P_{ei} = P_{ei-1} + hf_{i-1} \pm I \cdot E_c \quad (25)$$

em que:

L_c = comprimento do microtubo conector, cm;

i = posição do microtubo conector ao longo da linha lateral;

P_{ei} = pressão na entrada do microtubo conector no ponto “ i ”, m.c.a;

P_{ei-1} = pressão no ponto anterior ao ponto “ i ”, m.c.a;

hf_{i-1} = perda de carga no trecho, m.c.a.;

I = declividade no terreno, decimal;

E_c = espaçamento entre microtubos conectores, m;

J = perda de carga unitária, m m⁻¹.

Os comprimentos dos microtubos conectores (L_c) utilizados na linha lateral estão apresentados na Tabela 9.

Nota-se que o comprimento do microtubo variou de acordo com a pressão no ponto “ i ” (pressão no ponto de inserção do microtubo na linha lateral). Portanto, o aumento da pressão no ponto i ocasionou um aumento no (L_c). Essa variação de comprimento visou compensar a perda de carga existente na linha lateral e no microtubo conector mantendo assim, a vazão nos microtubos emissores uniforme.

O comprimento mínimo do microtubo conector considerado no dimensionamento foi de 37,4 cm. Com esse comprimento, não seria possível irrigar as alfaces das extremidades. Contudo, tem-se o microtubo emissor de 30 cm ligado ao conector por

meio do segmento de tubo de derivação, o que aumenta o alcance do ponto de saída d'água dos emissores.

Tabela 9 - Comprimentos dos microtubos conectores utilizados ao longo da linha lateral

Nº do microtubo conector	E (m)	Q (L h ⁻¹)	P _{ei} (kPa)	L _c (cm)
1	0,9	2,4	14,42	37,4
2	1,8	4,8	14,42	37,4
3	2,7	7,2	14,43	37,4
4	3,6	9,6	14,44	37,4
5	4,5	12,0	14,45	37,5
6	5,4	14,4	14,46	37,5
7	6,3	16,8	14,47	37,6
8	7,2	19,2	14,49	37,7
9	8,1	21,6	14,51	37,8
10	9,0	24,0	14,53	37,9
11	9,9	26,4	14,56	38,0
12	10,8	28,8	14,59	38,1
13	11,7	31,2	14,62	38,2
14	12,6	33,6	14,65	38,4
15	13,5	36,0	14,69	38,5
16	14,4	38,4	14,72	38,7

E: Espaçamento entre o microtubo conector de número 1 e os microtubos seguintes situados na linha lateral; Q: Vazão na linha lateral; P_{ei}: pressão na entrada do microtubo conector no ponto “i”; L_c: comprimento do microtubo conector.

O comprimento dos microtubos emissores permaneceu com 0,3 m ao longo da linha lateral, visto que, não houve alteração na pressão no segmento de tubo, do qual esses microtubos derivaram.

4.4 Avaliação hidráulica do sistema

O desempenho hidráulico de um emissor foi determinado, dentre outros fatores, pelo coeficiente de variação de fabricação, que é uma medida de variação de fluxo causada pela variação no processo de fabricação. O emissor avaliado apresentou um CVf de 4,4%, valor considerado bom segundo Solomon (1979) e segundo a ABNT (1986). De acordo com Dantas Neto et al. (1997), pequenas diferenças entre dois emissores aparentemente idênticos podem ocasionar modificações significativas na vazão do sistema. Logo, a qualidade do emissor é uma informação muito importante, pois, alto CVf pode causar baixa uniformidade de vazão no sistema.

As Figuras 12, 13, 14 e 15 que serão mostradas a seguir, referem-se aos testes realizados com emissores dimensionados desprezando a perda de carga localizada. Estes testes foram de extrema importância para a determinação de Hloc. As pressões de alimentação utilizadas foram de 14,7; 18,6; 39,2 e 58,9 kPa.

Os ensaios realizados em laboratório, com o sistema de irrigação com ultra baixa vazão (UBV), estabeleceram a relação entre a vazão e pressão dos microtubos (Figura 12). Karmeli (1977) comenta que os emissores de longo percurso podem ter valores de expoente que variem de 0,5 a 1,0, portanto, o expoente com valor de 0,7999 apresentado pela equação é coerente com o que preconiza o autor.

Figura 12 - Curva vazão versus pressão do sistema de irrigação com derivação

A relação entre a pressão no segmento de tubo de derivação (Pst) calculada com a observada pode ser visualizada na Figura 13. As Pst observadas foram de 2,3; 2,9; 6,0 e 8,0 kPa e diferiram bastante das Pst previstas nos cálculos que foram de 5,3; 7,3; 17,3; e 28,4 kPa, apresentando valores inferiores ao estimado para as pressões de alimentação utilizadas nos ensaios. Constatou-se que estava ocorrendo perda de carga localizada a qual não havia sido inicialmente levada em consideração.

Figura 13 - Relação entre Pst calculado e Pst observado

Segundo Azevedo Netto (1998) as perdas localizadas podem ser desprezadas nas tubulações longas cujo comprimento exceda cerca de 40000 vezes o diâmetro. São ainda desprezíveis nas canalizações em que a velocidade é baixa e o número de peças especiais não é grande. No entanto, isto não se enquadra neste caso, pois, o tamanho do microtubo conector é pequeno e, além disso, no segmento de tubo derivam seis emissores. O microtubo conector ocasionou perdas de carga localizada decorrentes da inserção de parte de seu corpo no interior da linha lateral e no segmento de tubo de derivação, funcionando como um ponto de formação, ou acréscimo, de turbulência, além disso, as mudanças na direção do fluxo d'água contribuíram para essas perdas.

A medida que a pressão de entrada aumentava, a perda de carga localizada também foi ampliada, isto ocorreu devido ao aumento da velocidade de escoamento elevando a Hloc. Para as pressões de 14,7; 18,6; 39,2 e 58,9 kPa, as perdas de carga localizadas foram de 3,0; 4,3; 11,3 e 20,4 kPa respectivamente, ou seja, estas perdas

localizada ocorridas pelo microtubo conector foram elevadas e devem ser consideradas com bastante critério no dimensionamento hidráulico do sistema de microirrigação (Figura 14).

Figura 14 - Relação entre Hloc e pressão de entrada

Segundo Porto (2006), o K é um coeficiente adimensional que depende da geometria da conexão, do número de Reynolds, da rugosidade da parede e, em alguns casos, das condições do escoamento, como a distribuição da vazão em ramificação.

Na Figura 15, observou-se que o valor de K que foi de 23,7; 19,2; 18,0 e 16,5 variou para cada condição ensaiada, reduzindo com o aumento do número de Reynolds que foi de 511,7; 717,6; 1102,6 e 1155,3 respectivamente, corroborando com os resultados observados por Rettore Neto et. al. (2009). De acordo com Souza e Botrel (2004) o K não é um valor constante em situações de baixo NR e, sim, uma função do NR. Como resultado, pode-se considerar que o efeito das forças viscosas altera sensivelmente o valor de K quando se trabalha com número de Reynolds sob regime laminar.

O modelo apresentado é caracterizado por coeficiente de determinação de 99,98%, demonstrando um bom ajuste dos dados observados. Portanto, o modelo utilizado fornece uma boa estimativa de K.

Figura 15 - Relação entre a constante K e o número de Reynolds

Os valores de vazão tiveram um índice de concordância de Willmott acima de 95 e 96% para o modelo I (sem Hloc) e modelo II (com Hloc) respectivamente. Os valores do erro médio absoluto (EMA) foram de 4,6% (modelo I) e 2,1 % (modelo II), o que demonstra que este ultimo modelo reduziu mais da metade do EMA quando comparado com o modelo I, levando a maior confiabilidade dos dados obtidos. O erro quadrado médio (EQM) apresentou valores de 0,05 (modelo I) e 0,02 L h⁻¹ (modelo II), ou seja, os valores medidos de vazão do modelo II ficaram próximos do valor da vazão de projeto (0,2 L h⁻¹), o que demonstra a qualidade do modelo matemático utilizado no dimensionamento dos microtubos. Portanto, os valores de índice de concordância de Willmott (d), EMA e EQM demonstraram que o modelo II teve melhor desempenho do que o modelo I (Tabela 10).

O melhor ajuste do modelo II comprova que é necessário considerar a perda de carga localizada no dimensionamento do sistema de irrigação com derivação utilizando microtubos. Recomenda-se a utilização desse modelo, desde que os seus parâmetros sejam antecipadamente ajustados e que o regime de escoamento no microtubo seja laminar.

Tabela 10 - Índice de concordância de Willmott (d), erro quadrado médio (EQM) e erro médio absoluto (EMA) para o modelo I e modelo II

Modelo		d (%)	EQM (L h ⁻¹)	EMA (%)
(I)	$L_c = \left(\frac{P_{ei} - P_{st}}{J} \right) \cdot 100$	95,6	0,05	4,6
(II)	$L_c = \left(\frac{P_{ei} - P_{st} - H_{loc}}{J} \right) \cdot 100$	96,4	0,02	2,1

4.5 Funcionamento do sistema de irrigação com ultra baixa vazão

Após a montagem do sistema foi verificado que o mesmo não estava funcionando corretamente. Apenas alguns gotejadores estavam emitindo água, isso pode ter ocorrido devido ao acúmulo de ar na tubulação e, como a pressão de alimentação era muito baixa, pode não ter havido pressão suficiente para expulsar o ar. Então, foi necessário fazer uma adaptação no sistema ligando o mesmo à outra entrada de água, com pressão de 15 m.c.a, ou seja, 10 vezes superior a pressão de alimentação previamente estabelecida.

Para o funcionamento adequado do sistema de irrigação, foi necessário primeiramente ligá-lo sob pressão mais elevada até a expulsão do ar presente na tubulação (durante aproximadamente 1 minuto) por meio do registro 2 e em seguida, alterava-se para a pressão de alimentação do sistema de 1,5 m.c.a. (registro 1). Isto foi repetido toda vez em que foi necessário ligar o sistema de irrigação (Figura 16).

A seta tracejada apresentada na Figura 16 indica o sentido em que a água com pressão mais elevada percorria. O ponto em comum indica o local em que tanto a água proveniente de uma pressão maior quanto a água procedente de pressão menor se encontram e, a partir deste ponto, o sentido do trajeto da água é o mesmo independente da pressão em que o sistema estiver funcionando.

Figura 16 – Vista superior do registro 2 no qual passava água com pressão elevada (a), vista dos equipamentos que permitiam a utilização de pressão elevada no início da irrigação (b)

4.6 Uniformidade de distribuição do sistema

Na Tabela 11 estão apresentados os resultados obtidos nas avaliações de uniformidade de distribuição. Com exceção do canteiro 3, observa-se que o sistema apresentou UD superior a 90,0% na primeira avaliação, valor considerado excelente por Bralts (1996). Na segunda avaliação ocorreu um decréscimo nos valores de uniformidade em todos os canteiros devido à presença de alguns emissores parcialmente obstruídos. Porém, verifica-se que a UD foi superior a 80% o qual é um valor considerado bom pelos autores citados acima.

No entanto, a uniformidade de distribuição poderia ter apresentado valores maiores conforme observado no trabalho de Souza, Pérez e Botrel (2006) os quais obtiveram excelentes uniformidades de aplicação de água com a utilização de microtubos. Contudo, foi observada a presença de partículas de areia no interior de alguns emissores, principalmente na segunda avaliação, isso pode ter ocorrido devido estes microtubos estarem em contato direto com o solo o que facilitou a entrada dos fragmentos de areia ocasionando obstrução, além disso, a presença de partículas sólidas provenientes da água de irrigação pode ter contribuído para isto. Segundo Ayers e Westcot (1985), o entupimento dos gotejadores causado por sólidos em suspensão pode reduzir a eficiência do sistema de irrigação, pois, partículas de silte e areia podem ser conduzidas para o interior do sistema.

Outro fator que pode ter contribuído para a redução da UD dos emissores foi a presença de ar na tubulação, pois, apesar de ter sido utilizada primeiramente a pressão elevada e depois a pressão de alimentação do sistema, verificou-se que mesmo assim, alguns microtubos só funcionavam após a tentativa de succionar a água nos gotejadores utilizando uma seringa. Observou-se que após a expulsão do ar os emissores funcionavam normalmente e que este problema foi mais frequente no final de cada linha lateral. Segundo Bonomo (1999) a diferença entre as vazões medidas ao longo da linha lateral, em relação a vazões médias e projetadas, pode ser devido ao mau dimensionamento dos filtros, a gotejadores obstruídos ou à presença de bolsas de ar na parte final das linhas laterais.

Supõe-se que a dificuldade para expulsar o ar existente pode estar na pressão no segmento de tubo de derivação (Pst) pois a mesma apresentava um valor muito baixo (0,3 m.c.a.), ou seja, a Pst pode não ter sido suficiente para eliminar o ar. Apesar disto, os valores de uniformidade de distribuição foram satisfatórios, pois a média da UD dos quatro canteiros foi de 91 e 89% para as avaliações antes do plantio e após a colheita respectivamente. Entretanto, deve-se realizar maiores estudos para solução dos problemas de acúmulos de ar e de obstrução dos emissores, de modo a melhorar o desempenho do sistema.

Conforme o critério de classificação dos valores de uniformidade estatística, para sistemas de microirrigação proposto por Bralts (2006), o desempenho do sistema pode ser considerado excelente, visto que, a média da Uest dos quatro canteiros foi de 92 e 90% para as avaliações antes do plantio e após a colheita da alface respectivamente.

Tabela 11 - Avaliação da uniformidade do sistema, antes do plantio e depois da colheita da alface

Antes do plantio		
Canteiro	UD (%)	Uest (%)
1	92,3	93,9
2	91,7	92,0
3	88,3	90,1
4	91,0	92,2
Após a colheita		
Canteiro	UD (%)	Uest (%)
1	88,6	89,5
2	89,0	90,9
3	87,9	89,3
4	89,7	90,3

Ressalta-se ainda que foram observados condutividade elétrica média de 0,4 dS m⁻¹ e pH médio de 6,6, no monitoramento da qualidade da água utilizada nas irrigações realizadas durante o ciclo experimental, sendo estes valores considerados seguros para irrigação (AYERS; WESTCOT, 1985).

4.7 Produtividade da cultura da alface

O peso médio das alfaces colhidas foi de 513,3 g, que corresponde a uma produtividade de 57,03 t ha⁻¹. Nos canteiros de número 1 e 4 foram obtidas

produtividades semelhantes mas, seus valores ficaram abaixo dos canteiros 2 e 3 os quais apresentaram uma produtividade de 61,5 e 65,7 t ha⁻¹, respectivamente (Figura 17). Isto pode ter ocorrido devido o canteiro 4 estar localizado nas proximidades da estufa que em horários específicos lhe causa sombreamento, recebendo um menor período de energia luminosa e consequentemente, ocasionando a redução da produção de alface. Além disso, as plantas de alface sofreram ataques de aves durante o experimento, sendo o canteiro de número 1 o mais atingido dentre os demais.

Segundo Gelmini e Trani (1996 apud GOMES, 2001), a produtividade da alface varia de 15 a 30 toneladas por hectare, ou seja, os valores apresentados se encontram bem acima dessa faixa. Considerando que este resultado não poder ser atribuído totalmente à utilização deste sistema de irrigação, comprova-se que é possível conseguir uma elevada produtividade com o emprego desta técnica.

Figura 17 - Produtividade da alface por canteiro

4.8 Custos do sistema de irrigação

O custo total para a implantação do sistema de irrigação com UBV utilizando microtubos foi de R\$ 293,23. Observa-se que a caixa d'água representa 52,5 % do custo total (Tabela 12). Devido a isto, recomenda-se realizar o máximo aproveitamento deste material, irrigando o maior número possível de canteiros, utilizando apenas um reservatório, reduzindo o custo por unidade de área.

O custo do sistema de irrigação com ultra baixa vazão utilizando microtubos foi comparado com um kit de irrigação por gotejamento para agricultura familiar, cujo valor é de R\$ 732,00 (indicado para irrigar até 500 m²). Entretanto, a caixa d'água não está inclusa neste kit sendo necessário acrescentar o valor do reservatório, totalizando R\$ 886,00. Para que o sistema de UBV fosse comparado com o do kit de irrigação, realizou-se um novo cálculo, sendo o sistema proposto adaptado para irrigar 500 m², resultando no custo total de R\$ 582,34, ou seja, a utilização deste sistema proporcionaria uma economia de 34,3 %.

A lista de materiais utilizados no experimento e seus devidos custos está apresentada na Tabela 12.

Tabela 12 - Lista dos componentes utilizados no sistema de irrigação e seus respectivos custos

Material	Quantidade	Preço unitário (R\$)	Total (R\$)
Adaptador para mangueira	4 unid	2,05	8,20
Bóia p/ caixa d'água	1 unid	5,00	5,00
Caixa d'água	1 unid	154,00	154,00
Curva (25 mm) soldável	6 unid	0,30	1,80
Curva soldável rosca (25 mm)	4 unid	1,06	4,24
Filtro de tela (155 mesh)	1 unid	15,00	15,00
Flange (20 mm)	1 unid	7,00	7,00
Flange (25 mm)	1 unid	8,00	8,00
Linha lateral (10 mm)	60 m	0,20	12,00
Microtubo	254,6 m	0,15	38,19
Registro (20 mm)	2 unid	9,00	18,00
Tes (20 mm)	4 unid	0,45	1,80
Tubo PVC (20 mm)	10,0 m	2,00	20,00

4.9 Considerações finais

Após a instalação do sistema de irrigação com ultra baixa vazão em campo, verificou-se que às vezes ocorreram entupimentos nos emissores, porém, os microtubos foram facilmente desobstruídos;

Os problemas de acúmulos de ar observados no sistema podem ter sido causados pela baixa pressão no segmento de tubo de derivação. Uma possível solução para este problema é elevar a P_{st} por meio da redução da perda de carga no microtubo conector ou utilizar maiores pressões de alimentação, ou ainda, utilizar ramificações com microtubos apresentando maiores vazões;

O grupo de pesquisa em hidráulica da ESALQ-USP está dando continuidade aos estudos de utilização de microtubos nos sistemas de microirrigação, com a finalidade de torná-la cada vez mais viável e acessível aos produtores rurais.

5 CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos, para as condições em que o presente estudo foi realizado, pode-se concluir que:

- A proposta de utilização do sistema de irrigação com ultra baixa vazão (UBV) utilizando microtubos pode ser uma alternativa economicamente viável devido ao baixo custo de investimento e operação do sistema.
- O modelo matemático proposto estimou a vazão dos emissores em função do comprimento do microtubo com bastante precisão e comprovou que é necessário considerar a perda de carga localizada no dimensionamento de microtubos com ramificação.
- O sistema de irrigação com UBV apresentou boa uniformidade de distribuição.
- Para que este sistema seja viável tecnicamente, deve-se realizar maiores estudos visando reduzir os problemas de acúmulos de ar e obstrução dos emissores, verificados durante o experimento.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, A.C.S. **Desenvolvimento de um sistema de irrigação por microaspersão com microtubos para hortas agrícolas**. 2008. 88p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALMEIDA, C.D.G.C. **Microaspersor com microtubos: um novo conceito hidráulico na irrigação localizada**. 2008. 104p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

ALMEIDA, C.D.G.C.; BOTREL, T.A.; SMITH, R.J. Characterization of the microtube emitter used in a novel micro-sprinkler. **Irrigation Science**, Berlin, DOI 10.1007/s00271-008-0135-y, 2008.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERING. ASAE EP405.1: **design and installation of microirrigation systems**. St. Joseph, 1999. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Requisitos mínimos para elaboração de projetos de sistema de irrigação localizada**; PNBR 12:-02-08-022. São Paulo, 1986.

AYERS, R.S., WESTCOT, D.W. **Water quality for agriculture** (Revised). Rome. FAO: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1985. 174 p. (Irrigation and Drainage Paper, 29).

AZEVEDO NETTO, J.M.; FERNANDEZ, M.F.; ARAÚJO, R.; ITO, A.E. **Manual de hidráulica**. 8.ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 669 p.

BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. **Manual de irrigação**. 8.ed. Viçosa: ed. UFV, 2006. 625 p.

BIEMBENGUT, M.S. **Modelagem matemática e implicações no ensino-aprendizagem de matemática**. Blumenau: Ed da FURB, 1999.134p.

BONOMO, R. **Análise da irrigação na cafeicultura em áreas de cerrado de Minas Gerais**. 1999. 224p. Dissertação (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

BOTREL, T.A. **Hidráulica de microaspersores e linha laterais para irrigação localizada**. 1984.78p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1984.

BRALTS, V.F. Field performance and evaluation. In: NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. (Ed.). **Trickle of irrigation for crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1986. chap. 3, p. 216-240.

DAKER, A. **Hidráulica aplicada à agricultura: A água na agricultura**. 6.ed. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1983. 316p.

DANTAS NETO, J.; MEDEIROS, M.G.A.; AZEVEDO, C.A.V.; AZEVEDO, H.M. Performance hidráulica e perfil de distribuição de água do microaspersor Naan 7110, sob diferentes condições de vento. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 1, p. 57-61, 1997.

DETOMINI, E.R. **Modelagem da produtividade potencial de Brachiara brizantha (variedades cultivadas Marandu e Xaraês)**. 2004. 112p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2004.

FAVETTA, G.M.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação das equações. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 58, n. 2, p. 427-430, abr./jun. 2001.

FILGUEIRA, F.A.R. **Novo manual de olericultura : agrotecnologia moderna na produção e comercialização de hortaliças**. 2.ed. Viçosa, 2003. 412p.

FRAUSTO, K. **Developing irrigation options for small farmers**. Institute Development Enterprises, 2000. 42p. <http://www.dams.org.br/docs/kbase/contrib/opt153.pdf> (10 Set. 2010).

FRIZZONE, J.A.; VIEIRA, A.T.; PAZ, V.P.S.; BOTREL, T.A. Caracterização hidráulica de um tubo gotejador. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 2, n. 3, p. 278-283, set./dez. 1998.

GOMES, T.M. **Efeito do CO₂ na água de irrigação e no ambiente sobre a cultura da 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.

GUIMARÃES, J.C. **Modelo matemático para dimensionamento e análise de redes hidráulicas em irrigação por aspersão convencional**. Lavras. 1995. 102p. Dissertação (M.S.) – Universidade Federal de Lavras, Lavras. 1995.

ISHAQ, A.M; IBRAHIM, M.A. The design of trickle irrigation systems with microtubes as emitters. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF MICROIRRIGATION, 5., 1995, Orlando. **Proceedings...** Orlando: ASAE, 1995. p. 708-716.

KARMEI, D. Classification and flow regime analysis of drippers. **Journal of Agricultural Engineering Research**, New York, v. 22, n. 2, p. 165-173, June 1977.

KELLER, J.; KARMELI, D. Trickle irrigation design parameters. **Transaction of the ASAE**. St. Joseph, v.17, n.4, p.678-684, July/Aug., 1974.

KELLER, J.; BLIESNER, R.D. **Sprinkle and trickle irrigation**. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. 625p.

NUNES, V.S. **Agricultura irrigada x saúde ambiental: existe um conflito**. EMBRAPA: Coletânea, Rumos e Debates, 2001. Disponível em: <www.embrapa.br>. Acesso em: 10 ago. 2010.

OLIVEIRA, A.M.S.; PORTO FILHO, F. de Q; MEDEIROS, J.F. de; COSTA, M. DA C. Caracterização hidráulica do tubo gotejador hidrorip II. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.4, n.3, p.483-486, 2000.

OLIVEIRA, C.A. da S. **Hidráulica de gotejadores e de linhas laterais para Irrigação por gotejamento**. 1978.72p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa , 1978.

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

PORTO, R.M. **Hidráulica básica**. 4.ed. São Carlos: EESC/USP, 2006. 540 p.

RAIJ, B. van.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: IAC, 1996. 85p. (Boletim Técnico, 100).

RETTORE NETO, O.; FRIZZONE, J.A.; MIRANDA, J.H.; BOTREL, T.A. Perda de carga localizada em emissores não coaxiais integrados a Tubos de polietileno. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.1, p. 28-39, jan./mar. 2009

RODRIGUES, L.N. **Modelo para dimensionamento e para simulação do desempenho de pivô central**. 1999. 145p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1999.

SILVA, C.A.; SILVA, C.J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. **Revista Científica Eletrônica de Agronomia**, Garça, v. 4, n. 8, 2005. Disponível em: <<http://www.revista.inf.br/agro/artigos/artigo08.pdf>>. Acesso em: 21 jan. 2010.

SOARES, A.A.; BERNARDO, S.; LOUREIRO, B.T.; CONDÉ, A.R. Características hidráulicas de microtubos “ciplá” e de linhas laterais para irrigação por gotejamento. **Irrigação e Tecnologia Moderna**, Brasília, v. 10, n. 1, p. 5-9, set. 1982.

SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.22, n.5, p.1034-1038, Sept/Oct. 1979.

SOUZA, R.O.R.M. **Modelagem, desenvolvimento de software para dimensionamento, e avaliação de sistema de irrigação por gotejamento com microtubos**. 2005. 112p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

SOUZA, R.O.R.M.; BOTREL, T.A. Modelagem para o dimensionamento de microtubos em irrigação localizada. **Agriambi**, Campina Grande, v. 8, n.1, p. 16-22, 2004.

SOUZA, R.O.R.M.; PÉREZ, G.F.E.; BOTREL, T.A. Irrigação localizada por gravidade com microtubos. **Irriga**, Botucatu, v. 11, n. 2, p. 266-279, abr./jun. 2006.

SOUZA, R.O.R.M.; MIRANDA, E.P.; NASCIMENTO NETO, J.R.; FERREIRA, T.T.S.; MESQUITA, F.P. Irrigação localizada por gravidade em comunidades agrícolas do Ceará. **Revista Ciência Agrônômica**, v. 40, n. 1, p. 34-40, jan-mar. 2009.

SOUZA, W.J. **Escoamento em regime turbulento aplicado à Irrigação localizada com microtubos**. 2008. 117p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

TEODORO, R.E.F.; OLIVEIRA, A.S.; MINAMI, K. Efeitos da irrigação por gotejamento na produção de pimentão (*Capsicum annuum* L.) em casa-de-vegetação. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 50, n.2, p. 237-243, jun. 1993.

USDA - SOIL CONSERVATION SERVICE. **Trickle Irrigation**, Washington D.C.1979.cap 7, p. 29-38.

VERMEIREN,L.;JOBLING, G.A. **Irrigação localizada**. Trad. de H.R. Gheyi, F.A.V.Damasceno, L.G.A. Silva Jr. e J.F. de Medeiros. Campina Grande: UFPB, 1997. 184p.

VERMEIREN,L.;JOBLING, G.A. Localized Irrigation. Design, Installation, Operation, Evaluation. **Irrigation and Drainage**, Roma, n.36, p. 203, 1980.

WILLMOTT, C.J.;CKLESON,S.G.;DAVIS,R.E.Estatistics for Evaluation and comparison of models. **Jounal of Geophysical Research**, Ottawa, v.90, n.C5, p.8995-9005,1981.

ANEXOS

ANEXO A Deduções e simplificações para obter a equação que calcula a vazão do microtubo emissor eq. (18)

A vazão no microtubo conector (Q_c) é igual a vazão no microtubo emissor (q_e) multiplicado pelo número de emissores

$$Q_c = n \cdot q_e \quad (1)$$

A pressão na entrada do microtubo conector (P_e) é igual a soma da perda de carga no microtubo conector (hf_c) com a perda de carga no microtubo emissor (hf_e)

$$P_e = hf_c + hf_e \quad (2)$$

Utilizou-se a equação universal da perda de carga no cálculo de (hf_c) e (hf_e)

$$hf = \frac{8fLQ^2}{\pi^2 D^5 g} \quad (3)$$

Substituindo a eq. (3) na eq. (2) temos:

$$P_e = \frac{8f_c L_c (n \cdot q_e)^2}{\pi^2 D_c^5 g} + \frac{8f_e L_e q_e^2}{\pi^2 D_e^5 g} \quad (4)$$

Colocando em evidência os termos em comum:

$$P_e = \frac{8 \cdot q_e^2}{\pi^2 g} \left(\frac{n^2 L_c f_c}{D_c^5} + \frac{L_e f_e}{D_e^5} \right)$$

Passando (q_e) para o primeiro membro, determinou-se a equação a seguir:

$$q_e = \sqrt{\frac{\pi^2 g P_e (D_c^5 D_e^5)}{8(n^2 D_e^5 L_c f_c + D_c^5 L_e f_e)}}$$

ANEXO B -Desenho esquemático do sistema de irrigação com derivação