



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO SEMI-ÁRIDO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MANEJO DE SOLO E ÁGUA

ALYSSANDNY FRANCISCO MATOS XAVIER

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO E BAIXO CUSTO PARA
CULTURAS EM FILEIRAS E ADENSADAS

MOSSORÓ – RN

2016

ALYSSANDNY FRANCISCO MATOS XAVIER

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO E BAIXO CUSTO PARA
CULTURAS EM FILEIRAS E ADENSADAS

Dissertação apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre
em Manejo de Solo e Água.

Orientador (a): Prof. D.Sc. José Francismar de Medeiros

MOSSORÓ – RN

2016

© Todos os direitos estão reservados a Universidade Federal Rural do Semi-Árido. O conteúdo desta obra é de inteira responsabilidade do (a) autor (a), sendo o mesmo, passível de sanções administrativas ou penais, caso sejam infringidas as leis que regulamentam a Propriedade Intelectual, respectivamente, Patentes: Lei nº 9.279/1996 e Direitos Autorais: Lei nº 9.610/1998. O conteúdo desta obra tomar-se-á de domínio público após a data de defesa e homologação da sua respectiva ata. A mesma poderá servir de base literária para novas pesquisas, desde que a obra e seu (a) respectivo (a) autor (a) sejam devidamente citados e mencionados os seus créditos bibliográficos.

X3s

XAVIER, ALYSSANDNY FRANCISCO MATOS.
SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO E BAIXO
CUSTO PARA CULTURAS EM FILEIRAS E ADENSADAS /
ALYSSANDNY FRANCISCO MATOS XAVIER. - 2016.
49 f. : il.

Orientador: José Francismar Medeiros.
Coorientador: Indalécio Dutra.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal
Rural do Semi-árido, Programa de Pós-graduação em
Manejo de Solo e Água, 2016.

1. Déficit hídrico. 2. Agricultura Sustentável.
3. Irrigação Localizada. 4. Bubbler. I. Medeiros,
José Francismar, orient. II. Dutra, Indalécio ,
co-orient. III. Título.

ALYSSANDNY FRANCISCO MATOS XAVIER

SISTEMA DE IRRIGAÇÃO DE BAIXA PRESSÃO E BAIXO CUSTO PARA
CULTURAS EM FILEIRAS E ADENSADAS

Dissertação apresentada à Universidade
Federal Rural do Semi-Árido, como parte das
exigências para obtenção do título de Mestre
em Manejo do Solo e Água.

DATA DA DEFESA: 28/07/2016

BANCA EXAMINADORA



Prof. D.Sc. José Francismar de Medeiros – UFERSA

Orientador



Prof. D.Sc. Indalécio Dutra

Primeiro Membro



D.Sc. Francisco Valfísio Da Silva

Segundo Membro

“Talvez não tenha conseguido fazer o melhor, mas lutei para que o melhor fosse feito. Não sou o que deveria ser, mas Graças a Deus, não sou o que era antes”.

(Marthin Luther King)

OFEREÇO

A meu pai, que sempre me incentivou e investiu em meus estudos,
para que pudesse ser o que eu quisesse ser.

DEDICO

A toda minha família,
que sempre torceu pelo meu sucesso e conclusão desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e determinação para a realização de mais esta etapa de minha vida.

Ao Professor Nildo da Silva Dias, pela amizade, apoio e incentivo para que esse sonho fosse realizado.

Aos meus amigos da UFERSA, Silvio Roberto, Jussiara Jácome, Karem Mariane, Amsterdam e Lissia Letícia, por toda ajuda, confiança e credibilidade concedida a mim, para a concretização desse trabalho.

Aos meus amigos que sempre torcem, apoiam e vibram com minhas conquistas: Domingos Lamarque e Elza Pereira.

Aos meus pais José Xavier de Oliveira Lima e Maria Aline Matos Botêlho de Oliveira, pela educação a mim dada, proporcionando ter acesso a mais este nível de ensino e estudo.

Ao meu Professor e Orientador, José Francismar de Medeiros, pela paciência e credibilidade.

À Professora Eulene Francisco da Silva, pelas orientações, ensinamentos e tempo a mim concedido.

À Universidade Federal Rural do Semi-Árido – UFERSA, Departamento de Ciências Ambientais e Tecnológicas, Programa de Pós-graduação em Manejo de Solo e Água.

Ao CNPq, através do Projeto Casadinho/Procad, pelo apoio financeiro para desenvolver o Projeto de pesquisa que gerou esta dissertação.

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

A todos, meus sinceros agradecimentos!

RESUMO

O semiárido por apresentar condições climáticas desfavoráveis para agricultura, com déficit hídrico durante grande época do ano, chuvas mal distribuídas e altas temperaturas, necessita da irrigação para o desenvolvimento das culturas. Na ótica da agricultura sustentável, a irrigação localizada é o método de maior eficiência no uso da água, o que tem atraído os produtores rurais e as empresas agrícolas. Os sistemas de irrigação por gravidade em condutos fechados são os mais indicados para os produtores familiares, devido baixo custo e por operarem a baixas pressões. O presente trabalho teve como objetivo desenvolver um sistema de irrigação similar ao *bubbler* que permita aplicar água de forma localizada em plantas de cultivos em linhas e adensadas. Foram estabelecidas curvas de vazão-comprimento-carga hidráulica. Foi montado um modelo de dimensionamento para o sistema de irrigação, onde foram realizados testes de avanço em campo em diferentes solos, para estabelecer um modelo que relacione vazão-comprimento da bacia-tempo de irrigação e, por fim, a instalação do sistema de irrigação onde se avaliou a uniformidade da vazão na área. A instalação do sistema de irrigação foi realizada no município de Upanema/RN, em um Cambissolo de textura média, cultivado com palma forrageira, utilizando água de abastecimento. Em relação às curvas do teste de avanço da água no solo, pode-se dizer que as equações potenciais foram similares as equações logarítmicas. Recomenda-se o uso do modelo potencial para representar os dados da curva do teste de avanço de água no solo. As perdas de carga do protótipo praticamente não apresentaram variação e foram mínimas, já no projeto instalado este foi bastante expressivo e com algumas variações. O projeto instalado apresentou coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) e coeficientes de uniformidade estatístico (CUE) com valores variando de bom a excelente.

PALAVRAS CHAVE: Déficit hídrico, agricultura sustentável, irrigação localizada, *Bubbler*.

ABSTRACT

The semi-arid to present unfavorable weather conditions for agriculture, with water deficit during most time of the year, poorly distributed rainfall and high temperatures, require irrigation for crop development. In the perspective of sustainable agriculture, drip irrigation is the method of more efficient use of water, which has attracted farmers and agricultural companies. Irrigation systems by gravity in closed conduits are the most suitable for family farmers, due to low cost and operate at low pressures. This study aimed to develop a similar irrigation system to the bubbler which will enable water form located in crop plants in rows and dense. Flow-diameter-length-hydraulic load curves were established. A sizing model was fitted to the irrigation system where feed tests were carried out in the field in different soil, to establish a model that relates flow rate, length of the irrigation bowl-time and eventually the installation of the irrigation system which evaluated the uniformity of flow in the area. The installation of the irrigation system was carried out in the municipality of Upanema / RN, in a Cambisol medium texture, cultivated with forage cactus using water supply Regarding the water breakthrough curves test soil, it can be said that the potential equations were similar logarithmic equations. It is recommended the use of potential model to represent the data of the water feed test on the ground curve. The prototype of the load losses virtually showed no change and were minimal, since the installed project this was very significant and with some variations. The project installed presented distribution uniformity coefficients (CUD) and statistical uniformity coefficient (CUE) with values ranging from good to excellent.

KEYWORDS: water deficit, sustainable agriculture, drip irrigation, efficiency, *bubbler*.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Análise granulométrica dos solos	21
Tabela 2. Parâmetros da curva de retenção de água no solo, segundo modelo de van Genuchten.....	22
Tabela 3. Classificação dos coeficientes de uniformidade CUE e CUD.....	28
Tabela 4. Parâmetro da equação Potencial e Logarítmica e coeficiente de determinação ajustados para as curvas de avanço para diferentes vazões e solos.....	32
Tabela 5. Equações que relaciona a distância de avanço no sulco em função da vazão do emissor e o tempo de avanço para cada solo.....	33
Tabela 6. Equações que relaciona a distância de avanço no sulco em função da vazão do emissor e o tempo de avanço para cada solo.....	33
Tabela 7. Perdas de carga e vazões do protótipo e do projeto instalado	37
Tabela 8. Comparação das perdas de carga do projeto instalado	37
Tabela 9. Tempo de irrigação para aplicação de uma lâmina mínima de irrigação de 3,5 mm e vazões dos emissores para cada três comprimento de sulcos.....	47
Tabela 10 – Resumo das perdas de cargas do protótipo instalado	48

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Delimitação do Semiárido. Fonte: IBGE. Elaboração: Banco do Nordeste do Brasil (BNB)/Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE)..... 4
- Figura 2.** Sistemas de irrigação localizada: (A) Gotejamento; (B) Microaspersão; (C) *Bubler*. Fonte: EMBRAPA (2006)..... 6
- Figura 3.** Irrigação por Gotejamento. Fonte: <http://portuguese.alibaba.com> 8
- Figura 4.** Irrigação por Microaspersão. Fonte: <http://www.agroconsulte.com.br/resultado/26/microaspersao>..... 10
- Figura 5.** Irrigação por *Bubler*. Fonte: <http://www.edcentaurus.com.br> 11
- Figura 6.** (A) Irrigação por Superfície/Sulcos; (B) Irrigação por Superfície/Faixas; (C) Irrigação por Superfície/Inundação. Fonte: EMBRAPA. 13
- Figura 7.** Irrigação por Sulcos. Fonte: <http://diariocacadoreense.com.br> 15
- Figura 8.** Localização das áreas estudadas (Mossoró e Upanema – RN). Fonte: Wikipédia 21
- Figura 9.** Montagem do ensaio no campo: (A) demarcação do local e comprimento dos sulcos; (B) e (C) abertura e detalhe dos sulcos prontos, respectivamente 24
- Figura 10.** Detalhe do sistema irrigação *Burbble* em operação..... 27
- Figura 11.** Planta baixa do protótipo do sistema de irrigação 29
- Figura 12.** Curvas de avanço nos sulcos em diferentes solos: (A) – Solo 1- Alagoinha; (B) – Solo 2 – Sítio UFERSA; (C) – Solo 3 – Horta UFERSA; (D) – Solo 4 – Upanema, para diferentes vazões (sulcos) considerando os dados estimados pelas equações potenciais e logarítmicas 31
- Figura 13.** Curvas de comparação das equações potenciais e logarítmicas relacionadas com a equação múltipla dos diferentes solos: (A) – Solo 1- Alagoinha; (B) – Solo 2 – Sítio UFERSA; (C) – Solo 3 – Horta UFERSA; (D) – Solo 4 – Upanema 36
- Figura 14.** Gráfico comparativo das Perdas de Carga em função das Linhas laterais do Protótipo e do Projeto Instalado. 37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	OBJETIVO GERAL	3
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
3	REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1	USO DA IRRIGAÇÃO NO SEMIÁRIDO.....	4
3.2	AS TÉCNICAS DA IRRIGAÇÃO	5
3.2.1	Irrigação localizada	6
3.2.1.1	Irrigação por gotejamento	7
3.2.1.2	Irrigação por microaspersão	9
3.2.1.3	Irrigação por borbulhamento (“Bubbler”).....	10
3.2.2	Irrigação superficial	12
3.2.2.1	Irrigação por sulco.....	13
3.3	UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DA IRRIGAÇÃO	16
3.4	EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA DA RELAÇÃO VAZÃO-PRESSÃO DO EMISSOR.....	17
3.4.1	Equações de perda de carga da rede de distribuição	18
4	MATERIAL E MÉTODOS	21
4.1	LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS	21
4.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS	21
4.3	CURVA DE VAZÃO-COMPRI-MENTO-CARGA HIDRÁULICA PARA OS TUBOS EMISSORES DE POLIETILENO (PE)	22
4.4	CURVAS DE AVANÇO NAS BACIAS LONGAS (SULCOS) PARA DIFERENTES SOLOS	23
4.5	DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO	24
4.6	DIMENSIONAMENTO DO PROJETO PROTÓTIPO EM CAMPO PARA POSTERIOR AVALIAÇÃO	26
4.7	AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DO PROJETO INSTALADO	27
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	30
5.1	CURVA DE VAZÃO-COMPRI-MENTO-CARGA HIDRÁULICA PARA OS TUBOS EMISSORES EM POLIETILENO	30
5.2	CURVAS DE AVANÇO NAS BACIAS LONGAS (SULCOS) PARA DIFERENTES SOLOS	30
5.3	DIMENSIONAMENTO DO PROJETO PROTÓTIPO EM CAMPO PARA POSTERIOR AVALIAÇÃO	37
5.4	RESUMO DOS VALORES DE VAZÃO E PERDA DE CARGA DO PROTÓTIPO E DO PROJETO INSTALADO.....	37

5.4.1	Perda de carga pela diferença de nível	37
5.5	CÁLCULO DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO (CUE)	38
5.6	CÁLCULO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO (CUD) 38	
6	CONCLUSÃO.....	39
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	40
	APÊNDICE A – Memorial de cálculo	46

1 INTRODUÇÃO

O semiárido nordestino apresenta clima desfavorável para agricultura; em que se registra déficit hídrico durante grande parte do ano e chuvas mal distribuídas associadas a altas temperaturas, o que torna a técnica de irrigação necessária para o desenvolvimento das culturas.

São vários os métodos de irrigação disponíveis a serem adotados nos cultivos agrícolas, entretanto, cada sistema adapta-se melhor em situações específicas (Grah et al., 2012). Segundo Ribeiro et al. (2005) o uso da irrigação localizada vem crescendo cada vez mais devido ao avanço tecnológico na agricultura irrigada que procura, sempre, métodos de irrigação que apresentem maior eficiência do uso da água com o menor custo de produção. A irrigação localizada é o método de maior eficiência no uso da água, o que tem atraído os produtores rurais e as empresas agrícolas. Na irrigação localizada a água é aplicada por gotejadores ou microaspersores de forma pontual, somente a região da raiz é molhada. Dessa forma, as perdas de água por evaporação são minimizadas. Por isso, o volume de água para irrigação localizada é menor quando comparado aos demais métodos de aplicação, sendo uma vantagem para locais onde os recursos hídricos são escassos.

Rawlins (1977) nos Estados Unidos foi quem primeiro descreveu o sistema de irrigação localizada por gravidade em condutos fechados, chamando-o sistema de irrigação *bubbler*, ou como é mais conhecido no Brasil, irrigação por borbulhamento que opera a baixa pressão (entre 13 e 30 kPa) e difere dos outros tipos de irrigação localizada pelo fato do fluxo de água ser devido apenas à força da gravidade. O sistema, basicamente, não exige energia externa (bombeamento) ou filtração (Reynolds, 1993; Reynolds & YItayew, 1995). Mesmo quando o bombeamento é necessário, bombas de baixa capacidade de elevação são suficientes.

Apesar das vantagens do uso da irrigação na agricultura para o semiárido, o seu custo oneroso de instalação, funcionamento e manutenção são fatores que limitam a utilização desta técnica, especialmente pelos agricultores de produção familiar. Este fato tem despertado o interesse em estudos que utilizem técnicas de aplicação de águas adaptadas à produção familiar, principalmente no que se refere à redução dos custos com equipamentos e energia elétrica. Deste modo, os sistemas de irrigação por gravidade em condutos fechados, sejam os mais indicados para os produtores familiares por operarem a baixas pressões, baixo custo e de fácil manejo.

A simplicidade de instalação, o manejo fácil, a elevada eficiência de irrigação e o baixo

custo inicial do sistema podem permitir a sua adoção por parte do pequeno produtor (Andrade; Souza; Silva, 2003; Souza et al., 2005).

No Brasil, o sistema *bubbler* tem sido estudado no estado do Ceará, onde foram realizadas algumas avaliações (Souza, 2001; Dutra, 2002), obtendo-se coeficiente de uniformidade de distribuição acima de 93 %, demonstrando que o sistema apresentou bom desempenho no campo, com excelente adequacidade para irrigação de fruteiras, tais como: caju, manga, acerola, goiaba, abacate, graviola, mamão, citrus e outros.

Devido ao grande diâmetro do tubo emissor do sistema *bubbler*, praticamente, não se tem problemas com obstrução. Para irrigação das espécies vegetais cultivadas em linha e/ou maior densidade de plantio, não se recomenda o uso deste sistema, uma vez que a água necessitaria ser aplicada em bacias longas, na forma de sulco, para melhor redistribuição da água no solo suprindo todas as plantas, a menos que se utilize um maior número de emissores.

Por outro lado, os sistemas *bubbler* são mais apropriados quando se deseja utilizar águas residuárias e/ou salinas, ambas de alto potencial de obstrução. Entretanto, para qualquer situação há necessidade de estabelecer um modelo e adaptar os sistemas ao tipo de solo, as espécies cultivadas, ao sistema de plantio e a qualidade da água. Por exemplo, a irrigação de culturas em sistema de fileira como a palma e o sorgo forrageiro deve-se fazer adaptações do sistema *bubbler* para suprir bacias longas em formatos de sulcos como testado por Medeiros et al. (2014).

Assim, estes modelos e adaptações devem fornecer informações sobre a relação vazão do emissor *versus* o comprimento das bacias para diferentes tipos de solos. Além disso, há necessidade de se conhecer as curvas de vazão-pressão-comprimento-diâmetro para diferentes tipos de microtubos/espaguete disponíveis no mercado que podem ser utilizados na confecção dos emissores, como também as perdas de cargas nos diferentes tubos de polietileno comercializados no mercado local e perdas de carga localizada nas diferentes conexões. Com essas informações, será possível melhor dimensionar o sistema de irrigação, otimizando sua utilização.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho foi desenvolver um sistema de irrigação similar ao *bubbler* que permite aplicar água de forma localizada em plantas de cultivos em linhas e adensadas.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a) Estabelecer curva de vazão-comprimento-carga hidráulica para tubos emissores em polietilino;
- b) Determinar modelos relacionando vazão-comprimento da bacia-tempo de irrigação;
- c) Proposição de modelo de dimensionamento do sistema de irrigação;
- d) Instalação do sistema de irrigação e avaliação da vazão dos tubos emissores, como também uniformidade da vazão do sistema.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 USO DA IRRIGAÇÃO NO SEMIÁRIDO

A região do semiárido brasileiro (Figura 1) abrange uma área de 980.133,079 km² estando demarcado por 1.135 municípios correspondendo, portanto, a quase 63,0 % da região Nordeste (Piauí, Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Bahia), incluindo ainda parte do norte do Estado de Minas Gerais (Região Sudeste), com uma população de 22.598.318 milhões de habitantes, totalizando cerca de 46 % da população do Nordeste e 12 % da população do Brasil (INSA, 2010).



Figura 1. Delimitação do Semiárido. Fonte: IBGE. Elaboração: Banco do Nordeste do Brasil (BNB)/Escritório Técnico de Estudos Econômicos do Nordeste (ETENE).

O padrão climático da região varia do quente e úmido, ao quente e seco, passando por uma faixa de transição semiúmida, sendo classificado como megatérmico, seco, dividido em três tipos conforme a classificação de Köppen: BShw, com chuvas de verão, ocorrendo desde o sul do Piauí ao oeste da Bahia e de Pernambuco; BShw' com chuvas de verão-outono, predominando no norte do Piauí, no Ceará e Rio Grande do Norte e oeste da Paraíba e, BShs' com chuvas de outono-inverno, ocorrendo na região costeira da Paraíba, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Bahia; e apresenta temperaturas altas, variando entre 25 e 31 °C anuais, precipitações pluviais irregulares de curta duração e de alta intensidade, entre 280 a 720 mm anuais, concentrando-se entre três a quatro meses do ano, com consequente déficit hídrico durante boa parte do ano, ou seja, um ambiente quente e seco (Araújo Filho, 2002).

O semiárido nordestino apresenta clima desfavorável para agricultura devido o registro de déficit hídrico durante grande parte do ano e chuvas mal distribuídas associadas a altas temperaturas, o que torna a técnica de irrigação necessária para o desenvolvimento das culturas.

De acordo com Schuster & Srinivasan (2004), o aproveitamento dos recursos hídricos nas regiões semiáridas do nordeste brasileiro é uma prática bastante complicada devido às peculiaridades climatológica e geológica da região, que se caracteriza pela baixa pluviosidade com irregular distribuição espacial e temporal além da composição geológica regional desfavorável à retenção de grandes volumes de água das chuvas. As distribuições inconstantes das chuvas e os períodos prolongados de secas são os principais problemas da região semiárida em se tratando de potencial hídrico, então a utilização de técnicas de irrigação vem surgindo como uma medida necessária para melhorar esse quadro na região semiárida que afeta diretamente o homem do campo, situado nessas áreas, com graves situações econômicas e sociais.

A maioria desses agricultores trabalham com agricultura familiar, a qual é responsável por garantir boa parte do suprimento de alimentos, caracterizando-se como importante fornecedora de alimentos para o mercado interno brasileiro (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE, 2006). Em geral, esses agricultores são de baixa renda, e por consequência, apresentam baixa capacidade de adoção de tecnologias em irrigação, sendo necessário buscar meios que se enquadrem dentro das condições financeiras desses agricultores, buscando técnicas de baixo custo, mas que garantam bons resultados através da utilização da irrigação.

Os dados relativos ao aumento da produtividade, fundamentado na aplicação da irrigação, reforçam a necessidade de desenvolvimento e inserção efetiva de novas tecnologias no setor, tendo como objetivo a sustentabilidade dos recursos hídricos. Por conseguinte, pode-se pensar na manutenção da oferta de alimentos. De acordo com Christofidis (2007), o incremento da irrigação em terras destinadas à agricultura representa ganhos significativos em termos de produtividade.

3.2 AS TÉCNICAS DA IRRIGAÇÃO

A aplicação de água no solo com a finalidade de fornecer às espécies vegetais a umidade necessária ao seu desenvolvimento pode ser realizada por meio dos mais diversos métodos de irrigação. A grande quantidade de recursos hídricos requerida para a prática da

irrigação, o decréscimo de sua disponibilidade e o alto custo da energia necessária à sua aplicação têm aumentado o interesse pela racionalização desse recurso, de forma a minimizar as suas perdas (Azevedo et al., 1999).

3.2.1 Irrigação localizada

A irrigação localizada é uma tecnologia que vem sendo adotada recentemente pelos produtores, devido principalmente ao fato desta permitir um melhor aproveitamento de água, evitando desperdícios, e concomitantemente, aumentando a produtividade. Os sistemas de irrigação localizada no cenário agrícola brasileiro são de grande importância, com aplicações voltadas principalmente para a fruticultura, horticultura e fertirrigação (Matos et al., 1999). Na maioria das vezes, esses sistemas são mais utilizados em culturas perenes por apresentarem maior espaçamento entre plantas e entre fileiras.

Bernardo et al. (2009) relata que esses sistemas de irrigação se caracterizam por aplicar água somente na zona radicular das culturas, em pequenas intensidades, porém com alta frequência, de forma que seja possível manter a umidade do solo ao nível da capacidade de campo ou próximo a ele. Incluem-se na categoria irrigação localizada ou microirrigação, como é denominada por alguns autores, os sistemas por gotejamento e microaspersão (Figura 2). Também o sistema de irrigação por gravidade em condutos fechados, denominado de sistema de irrigação *bubbler*, que opera a baixas pressões e difere dos outros tipos de irrigação localizada pelo fato do fluxo de água ser devido apenas à força da gravidade.



Figura 2. Sistemas de irrigação localizada: (A) Gotejamento; (B) Microaspersão; (C) *Bubler*. Fonte: EMBRAPA (2006).

Como todos os sistemas de irrigação apresentam vantagens sendo assim pode-se destacar algumas: maior eficiência no uso da água, defensivos agrícolas e fertilizantes, quando adotada a técnica da quimição, devido esses sistemas não molhar toda a superfície do solo; economia de mão-de-obra, por se tratar de sistemas fixos, quando

comparados com os sistemas convencionais de irrigação por aspersão e por superfície; adaptam-se a diferentes tipos de solos e topografia; maior eficiência no controle fitossanitário, por não irrigar ervas daninhas e não molhar a parte aérea dos vegetais, o que reduz a incidência de patógenos nas folhagens e frutos, minimizando os gastos com herbicidas, inseticidas e fungicidas; quando comparada com outros métodos, a irrigação localizada tem a vantagem de operar sob baixas pressões de serviço e, conseqüentemente, com menor conjunto motobomba e consumo de energia (Curtis et al., 1996); reduz o perigo de salinidade para as plantas, pois mantém os sais diluídos na água do solo devido a aplicações frequentes, e também na zona do bulbo molhado, permitindo assim, o uso de água com maior salinidade.

Algumas desvantagens dos sistemas localizados: problemas de entupimento devido ao pequeno diâmetro dos emissores, causado principalmente por partículas de areia, fertilizantes, algas, bactérias, óxido de ferro e precipitados químicos, tornando-se necessária então, manutenção periódica; a uniformidade de distribuição dos emissores pode ser afetada, principalmente em áreas declivosas, onde emissores que operam com baixos valores de pressão podem ter variações de vazão significativas; pode ocorrer a limitação no desenvolvimento das raízes das plantas, devido ao fato das raízes tenderem a se desenvolverem somente na região do bulbo molhado, próximo ao emissor ao longo de cada linha lateral; alguns solos podem não ter capacidade de infiltração suficiente para absorver a água aplicada pelos emissores, sendo então necessário um manejo rigoroso; e como um pequeno volume do solo é umedecido, limita-se a habilidade da planta em crescer em busca de água e fertilizantes em locais afastados da zona úmida, o que pode acarretar prejuízos na produção, caso haja interrupção da irrigação.

Na irrigação localizada, a uniformidade de aplicação da água ao longo da linha lateral está intimamente relacionada à variação de vazão dos emissores, variação essa devida às perdas de carga ao longo do tubo e das inserções dos emissores, dos ganhos e perdas de energia de posição, da qualidade do tubo, das obstruções e efeitos da temperatura da água sobre o regime de escoamento e geometria do emissor (Howell & Hiller, 1974 e GOMES, 1999), todavia, estudos realizados em laboratórios concluíram que temperaturas entre 25 °C e 32 °C não alteram a vazão do gotejador de forma significativa (Oliveira, 1978; Oliveira et al., 2000).

3.2.1.1 Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento (Figura 3) foi desenvolvido em função da escassez de água. Este sistema aplica água em apenas parte da área, reduzindo assim a superfície do solo que fica molhada, exposta às perdas por evaporação. Com isto, a eficiência de aplicação é bem maior e o consumo de água menor.



Figura 3. Irrigação por Gotejamento. Fonte: <http://portuguese.alibaba.com>

Segundo Sijali (2001), a irrigação por gotejamento é capaz de fornecer água para as raízes de plantas individuais tão frequentemente quanto seja desejado, minimizando a perda de água por evaporação do solo. A aplicação de água ao solo, na irrigação por gotejamento, é sob a forma de “ponto fonte”, ficando a superfície do solo com uma área molhada com forma circular e o seu volume molhado com forma de bulbo, podendo os pontos próximos formar uma faixa molhada contínua (Pereira, 2004).

A irrigação por gotejamento permite a distribuição uniforme de água no solo a intervalos de tempos regulares, evitando efeitos adversos de sub ou super irrigação em certas partes aéreas (Woltering; Pasternak; Ndjeunga, 2011).

Este tipo de irrigação ainda possui custo inicial elevado, além de outras desvantagens como risco de entupimento dos emissores pela disposição de partículas minerais e orgânicas, concentração do sistema radicular e salinização. Entretanto, as suas vantagens como: o uso racional da água, fertirrigação, pouca mão-de-obra e facilidade de automação, redução de custos de produção, baixo consumo de energia, entre outros, associadas a um conjunto de fatores econômicos têm incrementado seu uso no mundo e no Brasil (Bernardo, Soares; Mantovani, 2006).

Segundo Phocaidés (2007), a irrigação por gotejamento é o método mais eficiente de uso de água para produção de culturas. Milhões de pequenos fazendeiros em países de terceiro mundo ainda não podem adotar essa técnica, devido ao alto custo inicial de

instalação do sistema e ao nível de manejo relativo sofisticado. Merry, Namara e De Lange (2006) argumentaram que por serem relativamente baratos e poderem ser gerenciados de forma individual, tais sistemas podem levar a ganhos substanciais na produção e proporcionar ganhos imediatos para pequenos agricultores.

Constantemente estão sendo feitas modificações para simplificar sistemas de irrigação por gotejamento e fazendo-os mais disponíveis. Estes sistemas tentam simplificar e seu designer, enquanto mantem alta frequência, alta eficiência e baixo volume de irrigação, vantagens básicas da irrigação por gotejamento. Algumas dessas modificações são a improvisação de emissores gotejadores e os sistemas de baixa pressão hidráulica, com o objetivo de tornar um sistema de baixo custo (Sijali, 2001).

Os sistemas de irrigação de baixo custo têm sido conhecidos por aperfeiçoar os rendimentos por unidade de volume de água e solo (Daka, 2006). Sendo o desafio encontrar um equilíbrio entre a disponibilidade e simplicidade de um lado e qualidade e longevidade do equipamento do outro lado (Woltering; Pasternak; Ndjeunga, 2011).

Sijali (2001) cita vários tipos de sistema de irrigação de baixo custo, além de apresentar sistemas alternativos, menciona orientações quanto ao manejo do sistema, bem como orientações de como fazer a instalação do mesmo. Coelho et al. (2012) também fala de sistemas de irrigação para a agricultura familiar, inclusive destacando o uso de emissores comerciais de baixo custo.

Os tipos de irrigação por gotejamento de baixo custo ou baixa pressão se caracterizam por disponibilizar água para as plantas a custos menores, seja por não necessitar de energia elétrica ou por reduzida necessidade de trabalhadores (Pachico, 2014)

3.2.1.2 Irrigação por microaspersão

Os microaspersores podem ser classificados como microaspersores rotativos ou estacionários (“spray”), podendo a água ser aplicada sobre ou abaixo da folhagem, dependendo da cultura e características da área. Os modelos de microaspersores rotativos variam de acordo com a pressão de serviço, vazão e características de aplicação de água, como precipitação, dimensão das gotas, número de bocais e padrão de distribuição de água. O movimento dos microaspersores são produzidos por mecanismos de impacto, de reação e de engrenagens. Os microaspersores estacionários (“sprays”), não possuem movimento de rotação, mas funcionam de forma parecida aos rotativos. Apresentam a vantagem de permitir sua utilização em áreas irregulares. A escolha do microaspersor depende de

diversas características, como a cultura, vazões e pressões disponíveis.

Como a intensidade de precipitação dos microaspersores diminui com o aumento da distância a partir do emissor, é necessária a superposição das áreas molhadas, mantendo assim, a distribuição uniforme da água. A microaspersão (Figura 4) apresenta todas as vantagens atribuídas aos sistemas de irrigação localizada, principalmente a facilidade de visualização de distribuição d'água na superfície do solo. Comparada ao sistema de gotejamento, oferece menores riscos de entupimento, pois o diâmetro dos emissores é maior do que dos gotejadores. Em contrapartida, pode favorecer o aparecimento de doenças devido ao fato de permitir o molhamento de parte do caule da planta.



Figura 4. Irrigação por Microaspersão. Fonte: <http://www.agroconsulte.com.br/resultado/26/microaspersao>.

3.2.1.3 Irrigação por borbulhamento (“Bubbler”)

Ahmed I Al-Amoud (2008) relata que a agricultura é considerada hoje um dos meios responsáveis pelo maior consumo de recursos hídricos no mundo. Além disso, a agricultura é um dos motivos que ocasionam à escassez (degradação) da água, devido à ausência de adequada gestão dos recursos hídricos, por conseguinte, há uma necessidade urgente para uma utilização ótima da água para agricultura. A esse respeito, a irrigação por gotejamento e práticas semelhantes, como sistema *bubbler* são considerados como alguns dos mais importantes meios práticos e eficazes para a aplicação de água de irrigação em comparação com outros métodos de irrigação.

A água, enquanto recurso limitado é necessário controlá-la através de métodos de conservação de água, tais como sistemas de irrigação modernos. A avaliação do desempenho da irrigação *bubbler* é importante, para garantir aplicação precisa da água de irrigação para evitar o seu desperdício e garantir sua conservação. Tendo em vista que sua

operação e os custos de manutenção para o sistema *bubbler* são substancialmente menores do que para outros sistemas de irrigação devido à menor necessidade de energia e poucas avarias mecânicas (Lidco, 1985; Waheed, 1990).

O sistema de irrigação *bubbler* (Figura 5) foi projetado e utilizado inicialmente para frutíferas (Rawlins, 1977; Behoteguy & Thornton, 1980; Hull, 1981). Esse sistema fornece água através de pequeno diâmetro (10 mm) a partir do tubo borbulhador de diâmetro maior. Devido ao diâmetro relativamente grande em comparação com o fluxo de gotejadores (emissores), torna-se mais difícil a sua obstrução, além disso, exige mínima filtragem e manutenção (Nakayama, 1986).



Figura 5. Irrigação por *Bubbler*. Fonte: <http://www.edcentaurus.com.br>

Sistemas de borbulhamento podem ser divididos em sistemas de alta e baixa pressão, em que os de baixa pressão são baseados em fluxo por gravidade, não requerem bombas mecânicas ou sistemas de filtração, e pode operar a pressões tão baixas quanto 1 m.c.a. O nome do sistema "*bubbler*" é derivado do ruído da água que flui para fora das mangueiras expulsando o ar do interior dos condutos, quando o sistema é ligado (Reynolds et al, 1995). O sistema *bubbler* é particularmente bem adaptado para a irrigação de frutíferas, e os sistemas de irrigação tradicionais, tais como sulcos, são facilmente convertidos em sistemas de borbulhamentos. Keller (1990) classificou sistemas *bubbler* na mesma categoria de baixo risco, como sistema de irrigação por superfície, como ambos os sistemas são, em grande parte baseado no fluxo de gravidade e não requerem bombas mecânicas ou sistemas de filtração.

É um sistema de baixo custo apropriado para fruteiras ou hortaliças, visto que se baseia em baixa carga hidráulica, podendo usar água de uma caixa elevada a no mínimo 2,5 m acima do solo, dispensando bombeamento (Keller, 1990). O sistema é simples e consiste

de linhas laterais conectadas à linha de derivação por registros. Cada linha lateral irriga duas fileiras de plantas, ficando centralizada entre as duas fileiras. Dois segmentos de mangueira plástica ou polietileno são conectados à linha lateral, para aduzir água a duas plantas.

Uma vez instalado, o sistema *bubbler* por ser fixo e envolver mangueiras de diâmetro menores que 10 mm, requer pouca mão-de-obra e, pelas vazões bem maiores que as dos sistemas de irrigação localizada convencionais, é de boa aceitação pelos produtores. O uso do sistema em campo, entretanto, difere do estabelecido no projeto porque é difícil manter as mangueiras emissoras de água nas posições originais; com isso, os irrigantes trabalham com as mesmas no nível do solo, controlando as vazões através de fechamento e sua abertura. É feita uma bacia no entorno da planta onde é colocada a extremidade da mangueira.

A água é conduzida da fonte até as plantas, por meio de tubos, eliminando as perdas por condução e minimizando as perdas por percolação, uma vez que se aplica a água somente em parte da área e sob a copa das plantas, em micro bacias. Outra redução das perdas de água ocorre em função da não existência de dispositivo na extremidade dos microtubos para dissipação da água e pressão, o que contribuiria para o processo de evaporação.

Em um estudo comparativo entre os sistemas de irrigação *bubbler* e o gotejamento tradicional sobre tamareiras, observou-se que, ocorreu uma maior acumulação de sais na camada superficial no sistema de gotejamento tradicional em relação ao sistema *bubber* (Naimah, 1985).

A simplicidade de instalação, o manejo e a elevada eficiência de irrigação do sistema *bubbler* podem permitir a sua adoção por parte do pequeno produtor, como demonstrado em sistemas instalados em Caucaia e Pentecostes, Ceará, onde apresentou uniformidade de distribuição de 95 % (Souza, 2001; Accioly, 2001), com excelente adequabilidade para o cultivo de culturas perenes, como caju, manga, acerola, goiaba, abacate, graviola, citrus etc, em áreas de até 4 ha (Reynolds, 1993; Reynolds et al.,1995). Tal sistema difere daquele proposto por Soares (1986), irrigação por mangueira - utilizando micro bacias; no *bubbler* as mangueiras apresentam menores diâmetros, são distribuídas em cada cova e amparadas por tutores, com vazão de 0,019 a 0,063 L s⁻¹ (Reynolds, 1993; Reynolds e Yitayew, 1995; Yitayew et al.,1999).

3.2.2 Irrigação superficial

Os sistemas de irrigação superficial (Figura 6), ou irrigação por gravidade, têm como principal característica distribuir a água, na área irrigada, utilizando a força da gravidade e a superfície do solo para o seu escoamento, permitindo um escoamento contínuo, sem causar erosão. Essa condição pode ser conseguida por sistematização do terreno ou por simples uniformização da superfície. Estes sistemas, em geral, são os de menor custo por unidade de área.

O termo “irrigação por superfície” se refere a um grande número de sistemas pelos quais a água é distribuída sobre o terreno por gravidade. A água é derivada à parcela na parte mais alta do terreno ou ao longo de um dos diques que a circunda, promovendo a irrigação ao escoar sobre a superfície. A taxa de escoamento depende, em grande parte, das diferenças quantitativas entre a vazão de entrada e a infiltração acumulada. Outros fatores que afetam o escoamento superficial estão associados à declividade da parcela e à rugosidade da superfície.



Figura 6. (A) Irrigação por Superfície/Sulcos; (B) Irrigação por Superfície/Faixas; (C) Irrigação por Superfície/Inundação. Fonte: EMBRAPA.

Como todos os sistemas de irrigação, a irrigação por superfície apresenta vantagens como: menor custo fixo e operacional, equipamentos simples, o vento não interfere no seu funcionamento, menor consumo de energia quando comparado com aspersão, não interfere nos tratos culturais e permite a utilização da água com sólidos em suspensão. Quanto às desvantagens, pode-se destacar a dependência das condições topográficas, a necessidade de sistematização do terreno, o manejo da irrigação é mais complexo, requer frequentes reavaliações de campo para assegurar bom desempenho, uma vez mal planejado pode apresentar baixa eficiência de distribuição de água.

3.2.2.1 Irrigação por sulco

A irrigação por sulcos se enquadra dentro do método de irrigação superficial e consiste

da inundação parcial e temporária, por condução da água na superfície do solo, através de pequenos canais ou sulcos, paralelos às fileiras das plantas, durante o tempo necessário para que a água infiltrada ao longo do sulco seja suficiente para armazenar no perfil de solo a quantidade de água necessária à irrigação da cultura. Existem diferentes tipos de sulcos, como por exemplo: retilíneos com gradiente, retilíneos em nível, em contorno, corrugações, em ziguezague, em dentes, etc. Em virtude da condução de água ser feita por meio de sulcos, sem exigência de tubulações e pressão, este sistema apresenta menor custo de implantação e operação do que os sistemas pressurizados (Mantovani et al., 2009).

Na irrigação por sulcos, em relação aos demais sistemas de irrigação por superfície, a vazão aplicada por unidade de largura pode ser reduzida substancialmente e há maior tolerância às condições topográficas adversas. A menor área molhada possibilita a redução das perdas de água por evaporação em culturas com maior espaçamento. Por exemplo, em pomares, a irrigação por sulcos pode ser considerada como uma forma de irrigação localizada (Scaloppi, 1986), pois é possível molhar somente uma fração da superfície do terreno (30 a 80 %). Por possibilitar a redução da área molhada, permite cultivar o solo e realizar colheitas logo após as irrigações. Este sistema de irrigação exige, em geral, mais mão-de-obra por unidade de área que os sistemas pressurizados e experiência profissional do irrigante para distribuir a água do canal secundário para os sulcos e controlar a vazão durante a irrigação. Por outro lado, a flexibilidade operacional desse sistema permite elevar a eficiência de irrigação, por possibilitar o ajuste da vazão aplicada às variações da taxa de infiltração do solo durante um evento de irrigação e entre irrigações. Os sistemas com derivação de água automatizada permitem a redução da mão-de-obra, melhoram a flexibilidade operacional e permitem a obtenção de maior eficiência de aplicação de água na parcela.

O sistema de irrigação por sulcos (Figura 7) adapta-se à maioria das culturas, principalmente às cultivadas em fileiras, tais como olerícolas, milho, feijão, algodão, batata, trigo, pomares etc. Os sulcos retilíneos apresentam melhor capacidade para o manejo da irrigação em relação aos demais sistemas de irrigação por superfície, possibilitando a obtenção de melhores índices de desempenho do sistema. Exigem, entretanto, terrenos bem sistematizados.



Figura 7. Irrigação por Sulcos. Fonte: <http://diariocacadoreense.com.br>

A irrigação por sulcos em solos salinos ou com água salina requer cuidados especiais, podendo resultar graves problemas quando o manejo não for apropriado (Bernardo et al., 2008). Os sais solúveis movimentam-se com a frente de molhamento concentrando-se nos pontos mais elevados da superfície do solo, prejudicando a germinação das sementes e as plantas sensíveis à salinidade. Técnicas de construção dos sulcos e de plantio podem minimizar o problema, como: construir sulcos com os bordos pouco inclinados e formando um pequeno dique no meio do canteiro, entre dois sulcos adjacentes, com plantio realizado na face lateral do sulco, próximo à água, pois o sal se concentrará no dique.

Como todos os sistemas de irrigação apresentam vantagens como: menor custo de implantação que o método de aspersão, operação não é afetada pelo regime de ventos, utiliza menos energia que irrigação pressurizada, não interfere nos tratamentos fitossanitários, menor perda de evaporação em relação à irrigação por inundação, não tem problemas de formação de crostas superficiais devido ao impacto das gotas de chuva, como o método de aspersão e os sedimentos na água não causam problemas de entupimento como no caso de aspersão.

E desvantagens como: requer mais mão de obra; ser limitado pela declividade do terreno; apresentar variabilidade das condições de infiltração ao longo do sulco: infiltra mais no início que no final do sulco; além de problemas com solos de elevadas taxas de infiltração: a água demora muito para chegar ao final do sulco, pois vai infiltrando no início. Muita perda por percolação e o excesso de sedimentos na água pode causar assoreamento nos sulcos, exigindo maior manutenção.

3.3 UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO DA IRRIGAÇÃO

A uniformidade trata-se da distribuição da água irrigada de forma mais igualitária possível para as plantas, sem risco de irrigação excessiva em algumas áreas enquanto outras não atingiram sua necessidade hídrica. A uniformidade de distribuição de água é uma informação importante para a avaliação de sistemas de irrigação localizada, tanto na fase de projeto como no acompanhamento do desempenho após a implantação (Favetta; Botrel, 2001).

A distribuição uniforme da água é essencial em qualquer método de irrigação, pois afeta a eficiência do uso da água e como consequência, a quantidade e a qualidade da produção. Santos et al. (2003) sustentam que a uniformidade influenciará o custo da irrigação, assim como o desempenho da cultura. Áreas irrigadas que apresentam baixa uniformidade de aplicação de água favorecerão o desenvolvimento desuniforme das plantas cultivadas, pois algumas receberam mais água que outras.

Segundo Solomon (1979), os fatores mais significativos que influenciam a uniformidade dos sistemas de irrigação localizada são: entupimento dos emissores, número de emissores por planta, coeficiente de variação de fabricação dos emissores e expoente do emissor, entre outros.

O índice de uniformidade frequentemente utilizado para avaliar sistemas de irrigação localizada instalados é o coeficiente de uniformidade de distribuição (Keller; Karmeli, 1975; Pizarro, 1990; Clemmens; Solomon, 1997), de acordo com a equação:

A irrigação localizada tem um grande potencial para reduzir o escoamento superficial e consumo de água, no entanto, sua avaliação é fundamental tanto na fase de instalação como posteriormente e periodicamente, pois desta forma, pode-se minimizar perdas de água, energia e fertilizantes. Um sistema de irrigação eficiente é aquele que irriga uniformemente, ou seja, a vazão de cada emissor é a mesma e está de acordo com o requerimento da cultura (Wu; Gitlin, 1973). Além disso, o sistema deve aplicar água uniformemente até certa profundidade do solo, proporcionando umidade necessária ao desenvolvimento normal das espécies vegetais. Para tal, é importante que a água seja aplicada evitando encharcamento e déficits na área irrigada, mesmo que seja aplicada a lâmina média requerida, poderá haver crescimento desuniforme da cultura.

A quantidade de água aplicada e sua uniformidade de distribuição pelos emissores são informações importantes para o dimensionamento e manejo racional de um sistema de irrigação localizada. Consequentemente, esta avaliação é relevante tanto para o projetista,

para confirmar se o dimensionamento foi realizado corretamente, como para o irrigante, de modo que este possa programar a irrigação, a fertirrigação e a avaliação do desempenho geral do sistema (Bralts; Kesner, 1983). Assim, ambos precisam saber se o sistema está operando eficientemente e se a vazão desejada está sendo fornecida a cada planta. As medidas de uniformidade expressam a variabilidade da lâmina de irrigação aplicada na superfície do solo. A performance dos sistemas de irrigação localizada pode ser avaliada através de medidas da pressão de serviço, vazão e uniformidade de aplicação de água.

Para não prejudicar a uniformidade de aplicação de água, recomenda-se que a variação máxima da vazão dos gotejadores seja de 10% em todo o sistema de irrigação (Keller; Karmeli, 1975; Merriam; Keller, 1978). Essa variação da vazão entre o primeiro e o último gotejador é resultante de uma variação de pressão ao longo da linha lateral (Rodrigo López et al., 1992; Bernardo; Soares; Mantovani, 2006).

Em síntese, pode-se afirmar que a aplicação uniforme de água na linha da cultura com irrigação localizada, depende principalmente do dimensionamento do sistema que compense as variações de pressão ao longo da lateral (Bucks; Myers, 1973), como também, das boas características hidráulicas dos emissores (Solomon, 1979). Sistemas bem dimensionados e uniformes na distribuição de água aplicada são fundamentais para a técnica de irrigação e quimigação, o que resulta em aumento de produtividade (Silva; Silva, 2005).

Já Wilcox e Swailes (1947) propuseram utilizar outro coeficiente de uniformidade para avaliação de sistemas de irrigação, denominado coeficiente de uniformidade estatístico (CUE), baseado no desvio padrão como medida de dispersão (Equação 2).

Marek et al. (1986) sugerem o uso do desvio padrão, pois essa medida de dispersão permite enfatizar os desvios maiores em relação à média, aumentando a sensibilidade do coeficiente de uniformidade, sendo útil especialmente para sistemas de microirrigação quando apresentam problemas de obstrução.

O CUE pode ser utilizado para: dimensionamento de sistemas de microirrigação como para sua avaliação em campo, sendo este estimado pelo desvio padrão e a média de uma amostra de valores de vazão de emissores medidos em campo.

3.4 EQUAÇÃO CARACTERÍSTICA DA RELAÇÃO VAZÃO-PRESSÃO DO EMISSOR

As características do fluxo do emissor são geralmente descritas através da relação entre

vazão e pressão, como também pelo expoente da vazão o qual caracteriza o fluxo (Karmeli, 1977).

A vazão do emissor, de acordo com Keller e Karmeli (1974), pode ser representada pela Eq. (1). Quanto menor o valor de x , menos a vazão é influenciada pelas variações de pressão. Segundo Pizarro Cabello (1996) um emissor perfeito teria o expoente $x = 0$ (autocompensante), os de regime laminar $x = 1,0$ e nos de regime turbulento $x < 1,0$. Já Keller e Karmeli (1974) consideram de regime laminar os emissores com expoente $x = 1,0$ e de regime turbulento os com $x = 0,5$ e Karmeli (1977) comenta que os emissores de longo percurso podem ter valores de x que variem de 0,5 a 1,0.

$$q = k \cdot H^x \quad (1)$$

em que:

q = vazão do emissor, $L \cdot h^{-1}$;

k = constante de proporcionalidade que caracteriza cada emissor;

H = pressão de serviço do emissor, m;

x = expoente que é determinado pelo regime de escoamento do emissor.

O desempenho hidráulico do emissor é determinado pelo expoente x , que é uma medida da variação do fluxo em resposta às variações de pressão; e pelo coeficiente de variação de fabricação, que é uma medida da variação do fluxo causada pela variação no processo de fabricação e pela sensibilidade à temperatura, que é dependente do tipo de fluxo do emissor (Lima, 1991).

3.4.1 Equações de perda de carga da rede de distribuição

Vermein et al (1997) relatam que as perdas de cargas por atrito na tubulação dependem principalmente da rugosidade da parede interna desta, de sua secção interna, do seu comprimento e da velocidade da água.

As fórmulas propostas, mais utilizadas para quantificar essas relações são:

Darcy – Weisback

$$h = \frac{f \cdot L \cdot V^2}{2 \cdot g \cdot D} \quad (2)$$

onde $f = 0,3164/Re^{0,25}$ (Blasius para regime turbulento em tubos lisos), ou $f = 64/Re$ (para fluxo laminar).

O número de Reynolds é dado pela seguinte equação:

$$Re = \frac{v \cdot D}{\nu} \quad (3)$$

em que

Re = número de Reynolds (adimensional);

V = velocidade da água no interior do tubo ($m \cdot s^{-1}$);

D = diâmetro interno do tubo (m);

ν = viscosidade cinemática da água ($m^2 \cdot s^{-1}$).

Nas condições normais de escoamento o número de Reynolds é interpretado conforme segue:

- $Re > 4000$, então o escoamento é turbulento.
- $Re < 2000$, então o escoamento é laminar.

Hazen – Williams

$$h = \frac{3,022 \cdot L \cdot V^{1,852}}{C^{1,852} \cdot D^{1,167}} \quad (4)$$

Scobey

$$h = \frac{K_s \cdot L \cdot V^{1,9}}{1000 \cdot D^{1,1}} \quad (5)$$

Nas fórmulas anteriores tem-se que:

h = perda de carga por atrito na tubulação de comprimento L em m;

V = velocidade média da água, em m/s;

D = diâmetro interno da tubulação, em m;

Re = número de Reynolds;

f , C , K_s , são constantes, denominados coeficientes de rugosidade.

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS

O experimento foi conduzido nos municípios de Upanema e Mossoró (Horta Didática, Alagoinha e Sítio UFERSA), Rio Grande do Norte (Figura 8). Os testes de avanço foram conduzidos em diferentes solos representativos da região (Latossolo, Argissolo, Cambissolo, e Neossolo Flúvico).

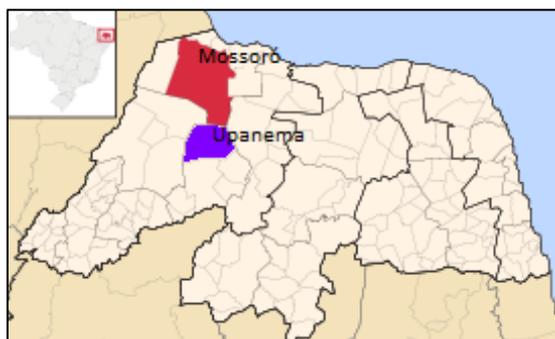


Figura 8. Localização das áreas estudadas (Mossoró e Upanema – RN). Fonte: Wikipédia

4.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS SOLOS

Foram realizadas análises físicas de granulometria (Tabela 1) e curva de retenção (Tabela 2) do solo, na camada de 0-60 cm, conforme EMBRAPA (2006).

Tabela 1. Análise granulométrica dos solos

Área	Prof. (m)	Distribuição do tamanho das partículas			Classificação Textural (SBCS)	Classificação do Solo
		Areia Total	Silte	Argila		
-----g kg ⁻¹ -----						
Upanema	0,00 – 0,20	0,72	0,05	0,23	Franco Argilo Arenosa	Cambissolo
	0,20 – 0,40	0,66	0,03	0,31	Franco Argilo Arenosa	
	0,40 – 0,60	0,54	0,04	0,42	Argila Arenosa	
Horta Didática (UFERSA)	0,00 – 0,20	0,88	0,03	0,09	Arenoso Franco	Argissolo
	0,20 – 0,40	0,83	0,04	0,13	Franco Arenoso	
	0,40 – 0,60	0,63	0,06	0,31	Franco Argilo Arenosa	
Alagoinha (UFERSA)	0,00 – 0,20	0,93	0,01	0,06	Arenoso	Latossolo
	0,20 – 0,40	0,92	0,02	0,06	Arenoso	
	0,40 – 0,60	0,91	0,03	0,06	Arenoso	
Sítio da	0,00 – 0,20	0,65	0,18	0,17	Franco Arenosa	Neossolo Flúvico

UFERSA	0,20 – 0,40	0,61	0,19	0,20	Franco Arenosa
	0,40 – 0,60	0,68	0,16	0,16	Franco Arenosa

Tabela 2. Parâmetros da curva de retenção de água no solo, segundo modelo de van Genuchten

Área	Prof. (m)	θ_r	θ_s	θ	n	m
Upanema	0,00 – 0,20	0,089	0,443	0,056	1,957	0,489
	0,20 – 0,40	0,100	0,430	0,047	1,779	0,438
	0,40 – 0,60	0,000	0,379	0,223	1,135	0,119
Horta Didática (UFERSA)	0,00 – 0,20	0,049	0,284	0,049	1,940	0,477
	0,20 – 0,40	0,128	0,249	0,050	2,410	0,579
	0,40 – 0,60	0,177	0,331	0,038	1,605	0,373
Alagoinha (UFERSA)	0,00 – 0,20	0,046	0,365	0,197	2,409	0,585
	0,20 – 0,40	0,124	0,363	0,182	2,136	0,513
	0,40 – 0,60	0,153	0,351	0,133	1,992	0,439

Os parâmetros acima ajustados foram obtidos por meio da equação de Van. Genuchten, descrita abaixo:

$$\theta = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left[1 + |\alpha \cdot h|^n\right]^m} \quad (6)$$

onde: θ é o conteúdo volumétrico de água ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$), h é o potencial matricial (cm); θ_r e θ_s são as umidades residuais e de saturação, respectivamente ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$); α é um parâmetro relacionado com o inverso da pressão de entrada de ar (cm^{-1}); n e m são parâmetros empíricos adimensionais.

4.3 CURVA DE VAZÃO-COMPRIENTO-CARGA HIDRÁULICA PARA OS TUBOS EMISSORES DE POLIETILENO (PE)

Para a confecção da curva vazão-diâmetro-comprimento-pressão foram realizados ensaios, inter-relacionando vazão, comprimento e pressão de serviço nos microtubos. Montou-se uma bancada de ensaios no Laboratório de Hidráulica da UFERSA, para a realização desses ensaios. Todos os ensaios realizados seguiram as normas técnicas para métodos de ensaio de equipamentos de irrigação da ABNT (2006).

No desenvolvimento do modelo empírico para o dimensionamento do tubo emissor

proposto, assumiu-se o diâmetro interno do microtubo determinado hidrodinamicamente em laboratório e que, a equação de Blasius estimou adequadamente o fator de atrito da equação de Darcy-Weisbach. Neste experimento foi utilizado microtubo de polietileno, fabricados para uso em irrigação, com diâmetro interno nominal de 4,0 mm, com seis comprimentos (0,50; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5 e 3,0 m) e cargas hidráulicas de 5, 10, 15, 20 e 25 kPa.

O abastecimento de água para o sistema da bancada, ocorreu por meio de bombeamento de um reservatório com capacidade de 5.000 L. A água após passar por um filtro de disco foi conduzida por uma tubulação de polietileno de baixa densidade com 25 mm de diâmetro interno, na qual, foram conectados os emissores. No início e no final desta tubulação instalou-se um manômetro eletrônico, com precisão de 0,1 kPa e um registro de gaveta para controle da pressão.

A medida gravimétrica da vazão foi realizada durante três minutos, conforme norma técnica para ensaios da ABNT (2006), para cada microtubo e comprimento sob cinco pressões. O peso foi transformado em volume ao dividi-lo pela massa específica da água, determinado em função da temperatura da água, medida a cada leitura de vazão. Para evitar erros sistemáticos, bem como, reduzir os erros de medição da vazão, cada determinação foi repetida três vezes. Com os valores médios de vazão, das três repetições, realizou-se uma análise de regressão ajustando a curva pressão-vazão com cinco pontos, para cada um dos seis comprimentos dos microtubos, através da equação rearranjada, de modo que H torna-se a variável independente ($H = aQ^b$). Nestas equações, foi substituído “Q” pelo valor da vazão nominal calculada para cada microtubo, determinando a pressão de serviço, específica para aquele comprimento e diâmetro do microtubo.

4.4 CURVAS DE AVANÇO NAS BACIAS LONGAS (SULCOS) PARA DIFERENTES SOLOS

Escolheu-se um local representativo de cada solo estudado, onde foram construídos cinco sulcos (Figura 9) com comprimentos de 5 m, onde foram ensaiadas diversas vazões (30 a 120 L h⁻¹).



Figura 9. Montagem do ensaio no campo: (A) demarcação do local e comprimento dos sulcos; (B) e (C) abertura e detalhe dos sulcos prontos, respectivamente

Em cada sulco foi avaliada a frente saturada de avanço da água, medida em diferentes tempos (1, 2, 5, 10, 15, 25 e 35 min), utilizando palitos para marcar os pontos de avanço em função do tempo e posterior determinação da distância percorrida.

Para cada vazão e solo, ajustou-se os dados de comprimento do avanço em função do tempo, usando os dois modelos abaixo:

$$\text{Eq. Potencial: } L = a \cdot T^b \quad (7)$$

$$\text{Eq. Logarítmica: } L = a + d \cdot \ln(T) \quad (8)$$

Em seguida, para cada tipo de solo, para o modelo potencial (Equação 6) ajustou-se o parâmetro “a” em função da vazão (q), utilizando o modelo potencial e o parâmetro b foi obtido pela média de “b” obtido para cada vazão, obtendo-se a equação geral (Equação 9).

$$L = \mu \cdot q^v \cdot T_a^\omega \quad (9)$$

4.5 DESENVOLVIMENTO DO MODELO DE DIMENSIONAMENTO DO SISTEMA DE IRRIGAÇÃO

O sistema de irrigação era do tipo localizado, com emissores constituídos de tubos de polietileno de diâmetro reduzido (4 mm de diâmetro interno), que fornecem uma vazão entre 30 e 120 L h⁻¹, para o comprimento de sulco de 2,0 a 3,0 m e submetido a uma carga hidráulica entre 2,0 e 3,0 m. A água era aplicada num sulco de 3,0 m, construído com declividade máxima de 0,5 % e com dimensões que durante um evento de irrigação o volume de água aplicado (V_{ap}) era inferior ao volume infiltrado e armazenado na

superfície dentro do sulco.

Durante um evento de irrigação o volume de água aplicado (V_{ap}) deve ser inferior ao volume infiltrado (I_{ac}) e armazenado no sulco (V_{sup}) (Equação 10).

$$V_{ap} \leq I_{ac} + V_{sup} \quad (10)$$

Sendo o volume de água aplicado (V_{ap}) descrito pela seguinte equação:

$$V_{ap} = q \cdot T_{irr} \quad (11)$$

Onde,

q – vazão, $L h^{-1}$;

T_{irr} – tempo de irrigação, h.

Os critérios utilizados para definir a vazão do emissor e o comprimento do sulco, incluindo a área do seu perfil, que são independentes, foram os seguintes: a) O tempo de avanço da água no interior do sulco deve ser igual ou inferior a $\frac{1}{4}$ do tempo de irrigação; b) A seção do sulco deve ser suficiente para acumular o total de água de irrigação durante a sua aplicação excede o volume infiltrado durante a irrigação; c) Assume-se que o avanço da água no sulco (comprimento da zona saturada na superfície do solo – L) é dado em função da vazão do emissor (q) e tempo de aplicação de água (T_a) pela Equação 12.

$$L = \mu \cdot q^{\nu} \cdot T_a^{\omega} \quad (12)$$

Em que: μ , ν e ω são parâmetros empíricos obtidos por análise de regressão múltipla de medidas obtidas em testes de campo realizada com sistema que simula pelo menos quatro vazões (entre 30 a 60 ou entre 60 a 120 $L h^{-1}$, dependendo se o solo é de baixa ou alta capacidade de infiltração) e se determina a distância de avanço em pelo menos seis tempos diferentes de aplicação (1, 2, 5, 10, 20, 35 min).

Considerando que o tempo de irrigação (T_{irr} , em min) pode ser definido pela lâmina de irrigação a ser aplicada (h , em mm), o comprimento do sulco ($E1$, em m) e espaçamento entre eles ($E2$, em m) e vazão do emissor (q , em $L h^{-1}$), é dada pela Equação 13.

$$T_{irr} = \frac{h \cdot E1 \cdot E2 \cdot 60}{q} \quad (13)$$

Assim, a vazão do emissor (q) pode ser determinada pela Equação 14.

$$q = \left(\frac{4^\omega}{60 \cdot \mu \cdot h \cdot E2} \right)^{\frac{1}{\nu+1}} \cdot T_{irr}^{\frac{1-\omega}{\nu-1}} \quad (14)$$

Combinando as Equações 12 e 13, pode-se obter o tempo de irrigação independente da vazão do emissor pela Equação 16 e em seguida obter a equação rearranjando a Equação 15.

$$T_{irr} = \left(\frac{\mu \cdot (60 \cdot h \cdot E2)^\nu \cdot E1^{\nu-1}}{4^\omega} \right)^{\frac{1}{\nu-\omega}} \quad (15)$$

Nesse caso, tendo-se os parâmetros da equação de avanço (μ , ν e ω), a lâmina de irrigação que se deseja aplicar (h) e o espaçamento entre os sulcos (E2), assume-se o comprimento do sulco que se deseja irrigar com cada emissor, obtendo-se assim o tempo de irrigação com a Equação 13. Em seguida, determina-se a vazão do emissor com a Equação 14 que deve ficar dentro da faixa considerada aceitável. Assim existe uma combinação de valores de comprimento e vazão dos emissores que pode satisfazer os critérios de dimensionamento.

4.6 DIMENSIONAMENTO DO PROJETO PROTÓTIPO EM CAMPO PARA POSTERIOR AVALIAÇÃO

O protótipo do sistema de irrigação foi dimensionado a partir das informações obtidas nas análises anteriores (caracterização física dos solos, curvas de vazão-diâmetro-comprimento-pressão, curvas de perda de carga e curvas de avanço nas bacias longas (sulcos) e, em seguida, o projeto foi executado no município de Upanema/RN. O sistema de irrigação foi dimensionado para a cultura da palma forrageira, plantada em fileiras duplas no espaçamento de 2,20 x 0,80 x 0,20 m, que foi irrigada com uma lâmina de 3,50 mm, por irrigação (Figura 10).



Figura 10. Detalhe do sistema irrigação Burbble em operação

A perda de carga de cada segmento da linha lateral foi calculada através da equação de Darcy-Weisbach, com fator de atrito calculado em função do número de Reynolds (Re), já a perda de carga causada pela conexão emissor-lateral é computada como perda de carga localizada (Bagarello et al., 1997). No entanto, como a magnitude desta perda foi relativamente pequena, neste estudo, esta perda não foi considerada, bem como a energia de velocidade na lateral.

4.7 AVALIAÇÃO HIDRÁULICA DO PROJETO INSTALADO

A metodologia utilizada para avaliação da uniformidade foi o coeficiente de uniformidade estatística (CUE) e de distribuição (CUD). Foram realizadas avaliações da área em quatro unidades operacionais, conseqüentemente apresentando vazões e pressões de serviço diferentes. As avaliações consistiram em procedimentos com coleta de dados em campo e definição dos parâmetros de desempenho da irrigação para a análise dos dados.

O “layout” do sistema de irrigação foi estabelecido no esquema apresentado na Figura 11.

Para a avaliação da uniformidade de aplicação do sistema de irrigação utilizou-se as seguintes equações:

$$CUE = 100 \left(1 - \frac{S_d}{L_m} \right) \quad (16)$$

$$CUD = \frac{q_{25\%}}{q_{total}} \cdot 100 \quad (17)$$

onde: CUE - Coeficiente de Uniformidade Estatística, em %; S_d - desvio-padrão dos dados de vazão; e L_m - média das vazões, $L \text{ h}^{-1}$; CUD – Coeficiente de Uniformidade de Distribuição; $q_{25\%}$ - média das 25% menores vazões; q_{total} – média de todas as vazões.

A interpretação do valor do coeficiente de uniformidade estatística (CUE) e coeficiente de distribuição (CUD) foram baseados na metodologia proposta por Mantovani (2001) que está apresentada na tabela abaixo.

Tabela 3. Classificação dos coeficientes de uniformidade CUE e CUD

CLASSIFICAÇÃO	CUE	CUD
Excelente	90-100	>84
Bom	80-90	68-84
Razoável	70-80	52-68
Ruim	60-70	36-52
Inaceitável	<60	<36

Fonte: MANTOVANI (2001)

Dimensionou-se o sistema de irrigação para o cultivo da palma irrigada com água de abastecimento, plantada em espaçamento duplo $2,2 \times 0,8 \times 0,2 \text{ m}$, com sulcos espaçados de $E2=3,0 \text{ m}$ com dez unidades operacionais e para receber uma lâmina de água por irrigação de $h=3,5 \text{ mm}$. O sistema foi alimentado através de uma caixa de água com capacidade de 5000 L para que a mesma suprisse o sistema de irrigação com a carga hidráulica desejada. A planta baixa do sistema de irrigação está na Figura 11.

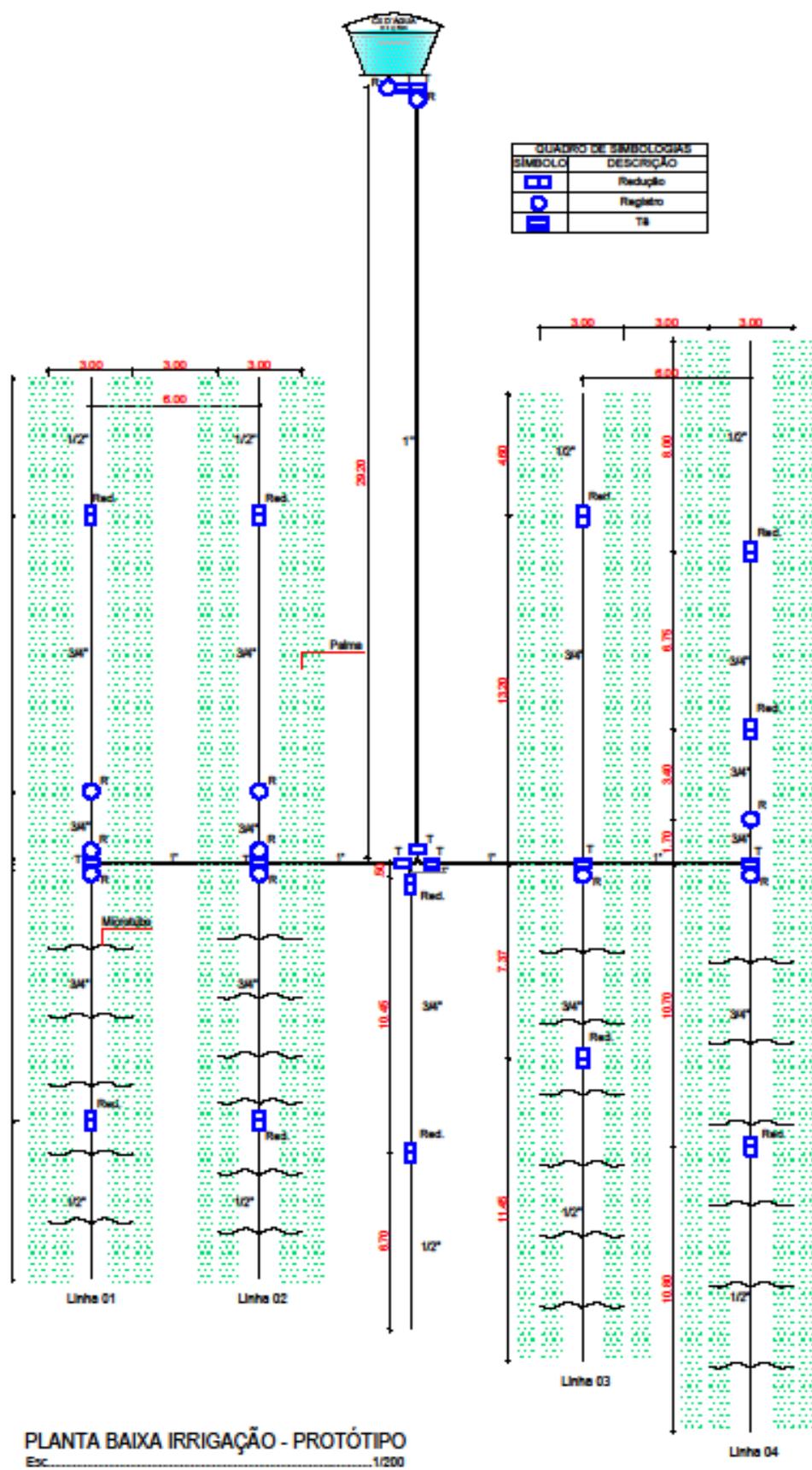


Figura 11. Planta baixa do protótipo do sistema de irrigação

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 CURVA DE VAZÃO-COMPRIIMENTO-CARGA HIDRÁULICA PARA OS TUBOS EMISSORES EM POLIETILENO

Para emissores constituídos a partir do microtubo utilizado na microaspersão, com diâmetro DN 4/7 mm, obteve-se a seguinte equação:

$$q = 10^{1,728 \cdot C^{-0,168}} \cdot H^{0,533} \quad (18)$$

em que:

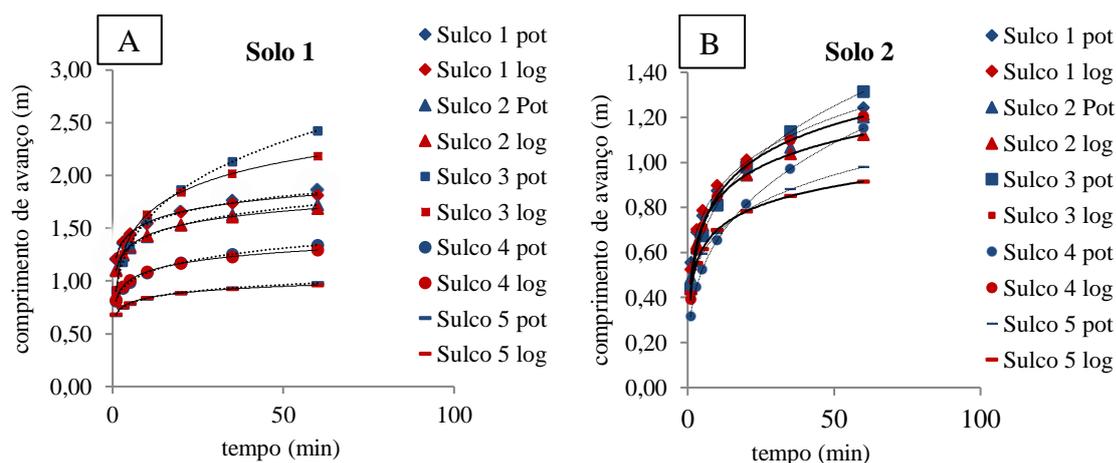
C = comprimento dos microtubos, cm;

H = carga hidráulica a qual os emissores foram submetidos, cm.

Considerando o expoente de H (0,533), este está dentro do intervalo citado por Farmeli (1997), que varia de 0,5 e 1,0, para emissores de longo percurso e o regime deste está na faixa do turbulento, segundo Keller e Karmeli (1974), expoente igual a 0,5.

5.2 CURVAS DE AVANÇO NAS BACIAS LONGAS (SULCOS) PARA DIFERENTES SOLOS

As curvas de avanço correspondentes às medições de campo para a irrigação por sulco fechado em nível são apresentadas na Figura 12. Observa-se semelhança quando se comparam as curvas simuladas por ambas as equações (potencial e logarítmica) com as medições de campo, em todos os solos estudados.



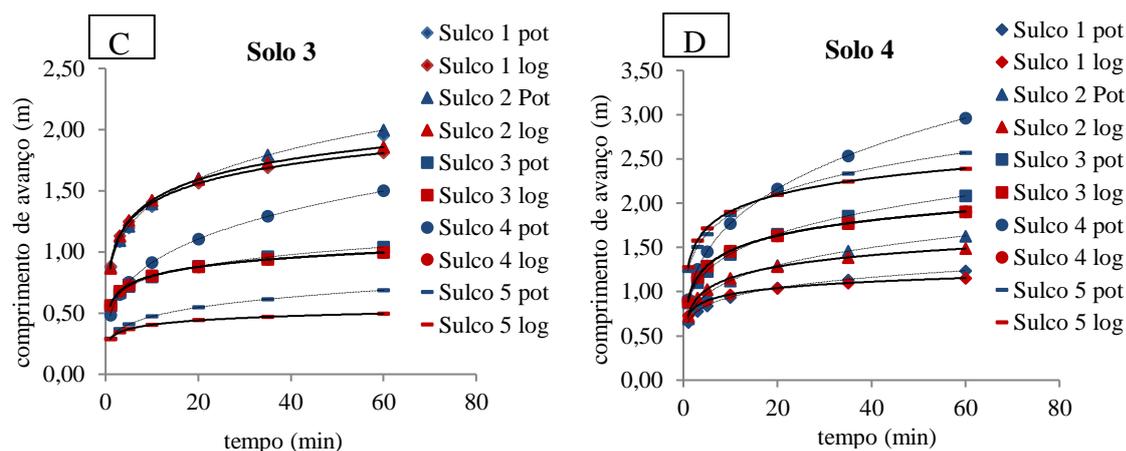


Figura 12. Curvas de avanço nos sulcos em diferentes solos: (A) – Solo 1- Alagoinha; (B) – Solo 2 – Sítio UFERSA; (C) – Solo 3 – Horta UFERSA; (D) – Solo 4 – Upanema, para diferentes vazões (sulcos) considerando os dados estimados pelas equações potenciais e logarítmicas

A Figura 12(A) apresenta as curvas de avanço estimadas pela equação potencial e logarítmica (simulação do avanço na irrigação por sulcos) e observadas em sulcos de precisão. Verifica-se que em ambos os sulcos do solo, localizado em Alagoinha (Latossolo), os modelos utilizados para obter a curva de avanço fornecem uma excelente aproximação entre elas. Sendo, neste caso, mais viável a utilização da curva de avanço obtida pela equação potencial, tendo em vista que a diferença média foi de 0,55 % e que a mesma é mais fácil de calcular e desenvolver o modelo geral para dimensionar o sistema.

A Figura 12(B) representa as curvas de avanço do solo referente ao Sítio do Campus Oeste (Neossolo Flúvico), a diferença média obtida foi de 1,86 % entre as curvas das equações empregadas. Devido à aproximação dos valores das curvas, também se recomenda o uso da equação Potencial.

Para o solo representativo da horta didática da UFERSA (Argissolo), os valores das curvas oriundas dos testes de avanço quando submetidas às equações Potenciais e Logarítmicas diferiram 5,39 % (Figura 12(C)). Essa diferença pode ser considerada irrisória, concluindo que o emprego da equação potencial seja mais viável.

Com relação ao solo de Upanema (Cambissolo), verificou-se uma diferença de 6,04 % (Figura 12(D)) quando se comparou os valores das curvas de avanço das equações potenciais e logarítmicas, confirmando juntamente com os valores obtidos nos solos mencionados anteriormente, que a equação mais adequada para se empregar nas curvas de avanço de água no solo seja a equação Potencial. Através dos valores de R^2 encontrados na Tabela 4, também, pode-se indicar a utilização da equação potencial nas curvas de avanço

de água no solo, em virtude da pequena variação entre os valores de R^2 .

Tabela 4. Parâmetro da equação Potencial e Logarítmica e coeficiente de determinação ajustados para as curvas de avanço para diferentes vazões e solos.

Equações	Vazão	Sulcos	a	b	R^2
Solo 1 – Alagoinha (Latosolo)					
Pot	100,50	1	1,2070	0,1065	0,7625
Log			0,1470	1,2148	0,8019
Pot	90,30	2	1,1074	0,108	0,9798
Log			0,1440	1,0984	0,9869
Pot	84,30	3	0,9071	0,2403	0,849
Log			0,3111	0,9118	0,8875
Pot	51,00	4	0,8132	0,1221	0,7394
Log			0,1151	0,8223	0,7764
Pot	45,90	5	0,6809	0,0889	0,8085
Log			0,0681	0,6829	0,8296
Solo 2 – Sítio UFERSA (Neossolo Flúvico)					
Pot	109,5	1	0,5546	0,1972	0,9245
Log			0,1629	0,5229	0,8712
Pot	88,45	2	0,4869	0,2204	0,9879
Log			0,1620	0,4597	0,9740
Pot	77,70	3	0,4361	0,2692	0,9893
Log			0,1990	0,3894	0,9523
Pot	51,60	4	0,3145	0,3169	0,9939
Log			0,1990	0,3894	0,9523
Pot	39,90	5	0,4301	0,2010	0,951
Log			0,1208	0,4204	0,9812
Solo 3 – Horta UFERSA (Argissolo)					
Pot	110,50	1	0,8722	0,1964	0,8051
Log			0,2265	0,8812	0,8111
Pot	90,00	2	0,8733	0,2020	0,9169
Log			0,2427	0,8631	0,9499
Pot	79,80	3	0,5614	0,1504	0,9208
Log			0,1069	0,5578	0,9431
Pot	53,40	4	0,4816	0,2771	0,9666
Log			0,1069	0,5578	0,9431
Pot	36,00	5	0,2913	0,2095	0,9214
Log			0,0510	0,2873	0,9624
Solo 4 – Upanema (Cambissolo)					
Pot	118,20	1	0,6561	0,1549	0,3525
Log			0,1036	0,7300	0,2186
Pot	96,00	2	0,6971	0,2076	0,7015
Log			0,1861	0,7254	0,7633
Pot	69,60	3	0,8773	0,2112	0,8109

Log			0,2483	0,8903	0,8871
Pot	55,80	4	0,9155	0,2868	0,8399
Log			0,2483	0,8903	0,8871
Pot	39,60	5	1,2403	0,1782	0,6992
Log			0,2715	1,2815	0,7458

Estabelecendo uma relação dentro de cada solo em função da vazão e o tempo de avanço, a distância de avanço L ficou expressa pelas equações contidas na Tabela 5. Isso foi obtido ajustando-se uma equação tipo potencial para o parâmetro “a” em função de cada vazão e o expoente de tal foi determinado pela média do parâmetro “b” encontrado para as diferentes vazões de cada solo, sendo que o expoente de “q” variou entre 0,5 a 0,99 e o do T_{av} entre 0,11 e 0,25.

Tabela 5. Equações que relaciona a distância de avanço no sulco em função da vazão do emissor e o tempo de avanço para cada solo

Solo	Equação
Solo Alagoinha	$L = 0,0563 \cdot q^{0,66} \cdot T_{av}^{0,11}$
Solo Sítio UFERSA	$L = 0,0155 \cdot q^{0,76} \cdot T_{av}^{0,25}$
Solo Horta UFERSA	$L = 0,0088 \cdot q^{0,99} \cdot T_{av}^{0,21}$
Solo Upanema	$L = 0,0825 \cdot q^{0,55} \cdot T_{av}^{0,21}$

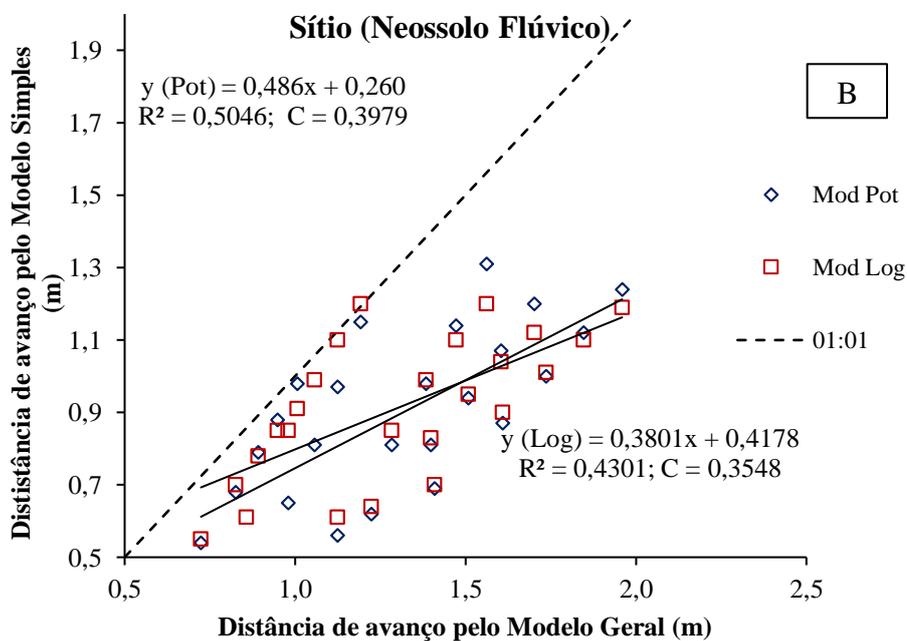
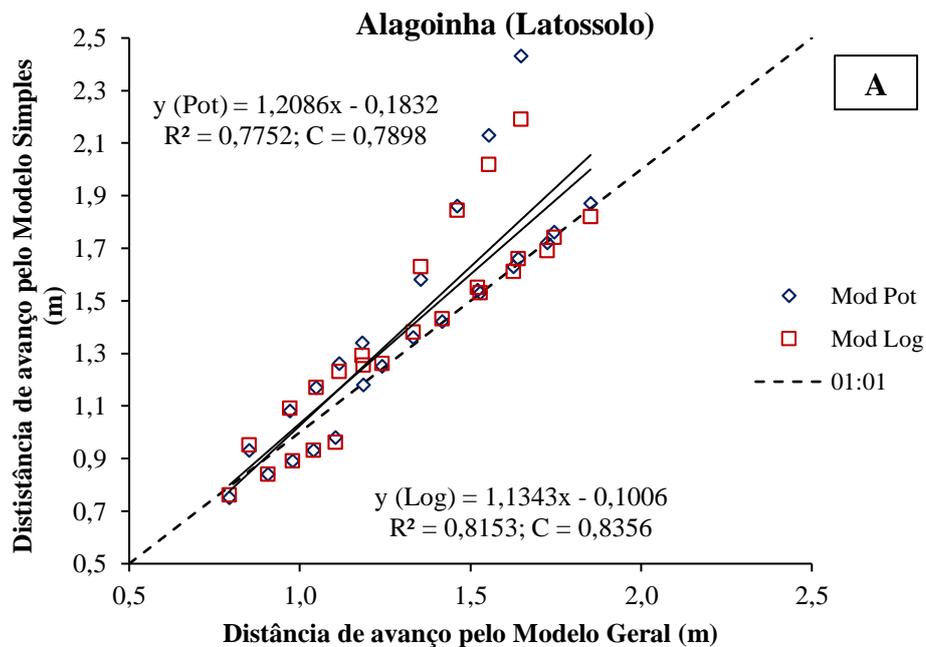
Para verificação da diferença entre as equações potenciais e logarítmicas, relacionando as equações múltiplas de cada tipo de solo, elaborou-se os gráficos representados na Figura 13.

Tabela 6. Equações que relaciona a distância de avanço no sulco em função da vazão do emissor e o tempo de avanço para cada solo

q (L/h)	T (min)	$L_{potencial}$ (m)	$L_{logarítmico}$ (m)	$L = a \cdot q^b \cdot T^c$ (m)	q (L/h)	T (min)	$L_{potencial}$ (m)	$L_{logarítmico}$ (m)	$L = a \cdot q^b \cdot T^c$ (m)
Solo I - Alagoinha					Solo II - Sítio UFERSA				
Sulco I					Sulco I				
100,50	3	1,36	1,38	1,33	109,50	3	0,69	0,70	1,41
100,50	10	1,54	1,55	1,52	109,50	10	0,87	0,90	1,61
100,50	20	1,66	1,66	1,64	109,50	20	1,00	1,01	1,74
100,50	35	1,76	1,74	1,74	109,50	35	1,12	1,10	1,85
100,50	60	1,87	1,82	1,85	109,50	60	1,24	1,19	1,96
Sulco II					Sulco II				
90,30	3	1,25	1,26	1,24	88,45	3	0,62	0,64	1,22
90,30	10	1,42	1,43	1,42	88,45	10	0,81	0,83	1,40
90,30	20	1,53	1,53	1,53	88,45	20	0,94	0,95	1,51

90,30	35	1,63	1,61	1,63	88,45	35	1,07	1,04	1,60
90,30	60	1,72	1,69	1,73	88,45	60	1,20	1,12	1,70
Sulco III					Sulco III				
84,30	3	1,18	1,25	1,19	77,70	3	0,56	0,61	1,12
84,30	10	1,58	1,63	1,35	77,70	10	0,81	0,85	1,28
84,30	20	1,86	1,84	1,46	77,70	20	0,98	0,99	1,38
84,30	35	2,13	2,02	1,55	77,70	35	1,14	1,10	1,47
84,30	60	2,43	2,19	1,65	77,70	60	1,31	1,20	1,56
Sulco IV					Sulco IV				
51,00	3	0,93	0,95	0,85	51,60	3	0,45	0,61	0,86
51,00	10	1,08	1,09	0,97	51,60	10	0,65	0,85	0,98
51,00	20	1,17	1,17	1,05	51,60	20	0,81	0,99	1,06
51,00	35	1,26	1,23	1,12	51,60	35	0,97	1,10	1,12
51,00	60	1,34	1,29	1,18	51,60	60	1,15	1,20	1,19
Sulco V					Sulco V				
45,90	3	0,75	0,76	0,79	39,90	3	0,54	0,55	0,72
45,90	10	0,84	0,84	0,91	39,90	10	0,68	0,70	0,83
45,90	20	0,89	0,89	0,98	39,90	20	0,79	0,78	0,89
45,90	35	0,93	0,93	1,04	39,90	35	0,88	0,85	0,95
45,90	60	0,98	0,96	1,10	39,90	60	0,98	0,91	1,01
q	T	L _{potencial}	L _{logarítmico}	L = a.q ^b .T ^c	q	T	L _{potencial}	L _{logarítmico}	L = a.q ^b .T ^c
(L/h)	(min)	(m)	(m)	(m)	(L/h)	(min)	(m)	(m)	(m)
Solo III - Horta UFERSA					Solo IV – Upanema				
Sulco I					Sulco I				
110,50	3	1,08	1,13	1,42	118,00	3	0,78	0,84	1,48
110,50	10	1,37	1,40	1,62	118,00	10	0,94	0,97	1,69
110,50	20	1,57	1,56	1,75	118,00	20	1,04	1,04	1,82
110,50	35	1,75	1,69	1,86	118,00	35	1,14	1,10	1,94
110,50	60	1,95	1,81	1,97	118,00	60	1,24	1,15	2,06
Sulco II					Sulco II				
90,00	3	1,09	1,13	1,24	96,00	3	0,88	0,93	1,29
90,00	10	1,39	1,42	1,41	96,00	10	1,12	1,15	1,48
90,00	20	1,60	1,59	1,53	96,00	20	1,30	1,28	1,59
90,00	35	1,79	1,73	1,62	96,00	35	1,46	1,39	1,69
90,00	60	2,00	1,86	1,72	96,00	60	1,63	1,49	1,80
Sulco III					Sulco III				
79,80	3	0,66	0,68	1,14	69,60	3	1,11	1,16	1,04
79,80	10	0,79	0,80	1,31	69,60	10	1,43	1,46	1,19
79,80	20	0,88	0,88	1,41	69,60	20	1,65	1,63	1,29
79,80	35	0,96	0,94	1,50	69,60	35	1,86	1,77	1,37
79,80	60	1,04	1,00	1,59	69,60	60	2,08	1,91	1,45
Sulco IV					Sulco IV				
53,40	3	0,65	0,68	0,88	55,8	3	1,25	1,16	0,90
53,40	10	0,91	0,80	1,00	55,8	10	1,77	1,46	1,03

53,40	20	1,10	0,88	1,08	55,8	20	2,16	1,63	1,11
53,40	35	1,29	0,94	1,15	55,8	35	2,54	1,77	1,18
53,40	60	1,50	1,00	1,22	55,8	60	2,96	1,91	1,26
Sulco V					Sulco V				
36,00	3	0,37	0,34	0,68	39,60	3	1,51	1,58	0,72
36,00	10	0,47	0,40	0,77	39,60	10	1,87	1,91	0,82
36,00	20	0,55	0,44	0,83	39,60	20	2,12	2,09	0,89
36,00	35	0,61	0,47	0,89	39,60	35	2,34	2,25	0,94
36,00	60	0,69	0,50	0,94	39,60	60	2,57	2,39	1,00



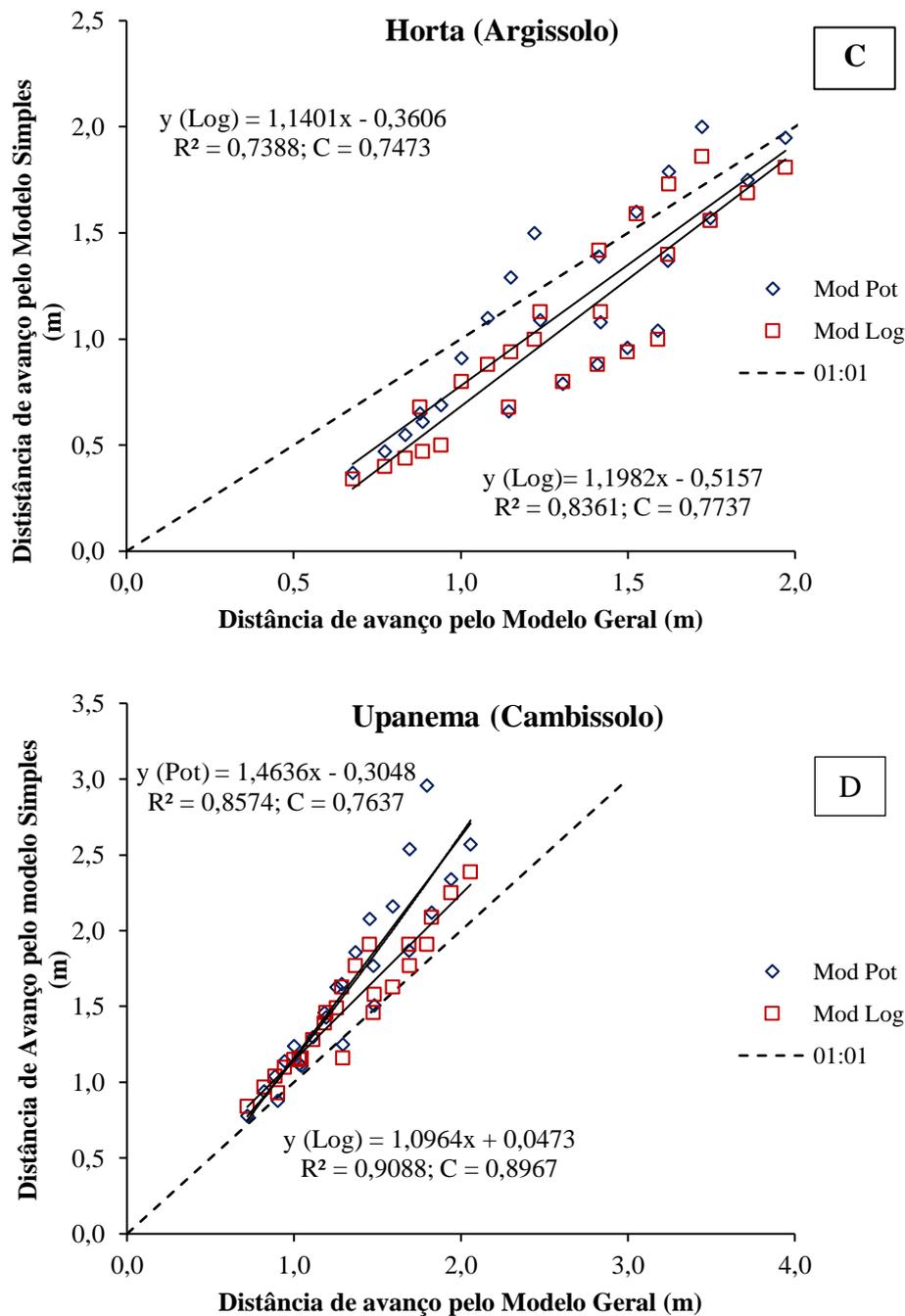


Figura 13. Curvas de comparação das equações potencias e logarítmicas relacionadas com a equação múltipla dos diferentes solos: (A) – Solo 1- Alagoinha; (B) – Solo 2 – Sítio UFERSA; (C) – Solo 3 – Horta UFERSA; (D) – Solo 4 – Upanema

Considerando os coeficientes de determinação (R^2), com exceção do gráfico do Sítio, todas as outras áreas estudadas apresentaram boa correlação, R^2 variando de 0,70 a 0,91, tanto para a equação potencial quanto logarítmica, e no Sítio o coeficiente variou de 0,40 a 0,50 para equação potencial e de 0,35 a 0,43 na logarítmica, ou seja, baixa correlação.

5.3 DIMENSIONAMENTO DO PROJETO PROTÓTIPO EM CAMPO PARA POSTERIOR AVALIAÇÃO

Os cálculos referentes ao dimensionamento do protótipo estão apresentados no Apêndice A.

5.4 RESUMO DOS VALORES DE VAZÃO E PERDA DE CARGA DO PROTÓTIPO E DO PROJETO INSTALADO

Tabela 7. Perdas de carga e vazões do protótipo e do projeto instalado

Valores de vazão e perda de carga do protótipo e do projeto instalado								
	Linha 01		Linha 02		Linha 03		Linha 04	
	Protótipo	Instalado	Protótipo	Instalado	Protótipo	Instalado	Protótipo	Instalado
Vazão (m ³ /s)	0.0000163	0.000235	0.0000299	0.000238	0.0000299	0.000225	0.0000299	0.000201
H _f (m)	0.0381	0.4324	0.0272	0.5233	0.0272	0.7139	0.0282	0.5762

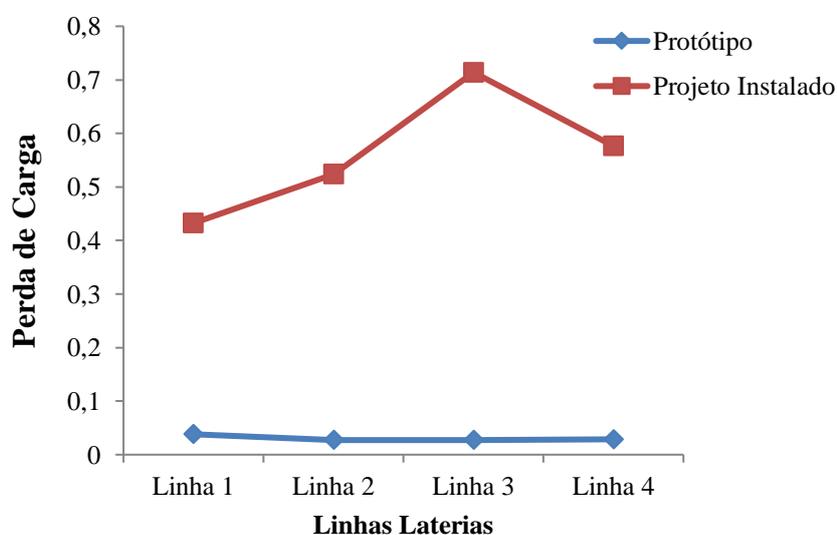


Figura 14. Gráfico comparativo das Perdas de Carga em função das Linhas laterais do Protótipo e do Projeto Instalado.

5.4.1 Perda de carga pela diferença de nível

Tabela 8. Comparação das perdas de carga do projeto instalado

Linha 01		Linha 02		Linha 03		Linha 04	
0,26	0,18	0,16	0,47	0,97	1,11	1,05	1,50
0,41	0,26	0,37	0,54	0,98	0,94	0,98	1,24
0,43	0,29	0,65	0,30	0,16	0,29	0,31	0,90

5.5 CÁLCULO DO COEFICIENTE ESTATÍSTICO (CUE)

$$CUE_{linha01} = 100(1 - \frac{S_d}{L_m}) \gg 100(1 - \frac{9,2}{84,47}) \gg 89,10\%$$

$$CUE_{linha02} = 100(1 - \frac{S_d}{L_m}) \gg 100(1 - \frac{7,02}{71,4}) \gg 90,16\%$$

$$CUE_{linha03} = 100(1 - \frac{S_d}{L_m}) \gg 100(1 - \frac{11,46}{67,47}) \gg 83,02\%$$

$$CUE_{linha04} = 100(1 - \frac{S_d}{L_m}) \gg 100(1 - \frac{4,09}{60,39}) \gg 93,23\%$$

Os valores dos coeficientes de uniformidade estatístico (CUE) obtidos na avaliação do projeto instalado são classificados como bom ($80 < CUE < 90$), para as linhas 1 e 3, e para as linhas 2 e 4 como excelentes ($CUE > 90$), segundo Mantovani (2001).

5.6 CÁLCULO DO COEFICIENTE DE UNIFORMIDADE DE DISTRIBUIÇÃO (CUD)

$$CUD_{linha 01} = \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \gg \frac{75,93}{84,47} \gg 89,90\%$$

$$CUD_{linha 02} = \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \gg \frac{61,59}{71,40} \gg 86,26\%$$

$$CUD_{linha 03} = \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \gg \frac{52,02}{67,47} \gg 77,10\%$$

$$CUD_{linha 04} = \frac{q_{25\%}}{q_{med}} \gg \frac{54,27}{60,39} \gg 89,87\%$$

Analisando os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD), as linhas 1, 2 e 4 obtiveram desempenho excelente ($CUD > 84\%$), já a linha 3 foi classificada como boa (CUD entre 68 e 84), conforme Mantovani (2001).

6 CONCLUSÃO

Recomenda-se o uso do modelo potencial para representar os dados da curva do teste de avanço de água no solo.

As perdas de carga do protótipo praticamente não apresentaram variação e foram mínimas, já no projeto instalado este foi bastante expressivo e com algumas variações.

Para o projeto instalado os coeficientes de uniformidade de distribuição (CUD) e os coeficiente de uniformidade estatístico (CUE) apresentaram índices que variaram de bom a excelente.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. Requisitos mínimos para elaboração de projetos de sistema de irrigação localizada. São Paulo: ABNT, 1986.18p.

ACCIOLY, A. Manejo de irrigação para cultura da goiabeira através de um sistema de irrigação de baixa pressão "Bubbler system". 2001. 98 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

AL-AMOUD, A.L. (2008). Performance of bubbler irrigation system as compared to trickle for large size date palm tree farm. Paper presentd at the Canadian Society for Bioengineering Annual Conference, Vancouver, British Columbia, No. CSBE 08-172.

ANDRADE, E. M.; SOUZA, I. H.; SILVA, E. L. Análise dos custos fixos de um sistema de irrigação localizado por gravidade-bubbler. Revista de Ciência Agrônômica, Fortaleza, v.33, n.1, p.64-69, 2003.

ANDRADE, L. Avaliação hidráulica e de resistência a tração de dois modelos de mangueiras gotejadoras. 2005. 76 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Irrigação e Drenagem)- Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

ARAÚJO FILHO, J. A. Caatinga: agroecologia versus desertificação. Ciência Hoje, 2002. Araújo, A. J. R. P. et al. Desertificação e seca: contribuição da ciência e tecnologia para a sustentabilidade do semi-árido do Nordeste do Brasil. Recife: Nordeste, 2002.

ASAE - American Society of Agricultural Engineers. ASAE EP 405. Design and installation of microirrigation systems. In: ASAE Standsrds 2003. St. Joseph: ASAE. 2003. p.900-905.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). Equipamentos de irrigação agrícola - Emissores e tubos emissores - Especificações e métodos de ensaio. ABNT NBR ISO 9261. São Paulo: ABNT, 2006. 17p.

AZEVEDO, C. A. V.; AZEVEDO, H. M.; DANTAS NETO, J.; MATOS, J. A. Avaliação da distribuição de água de um microaspersor autocompensante. Revista Irriga, Botucatu, v.4, n.3, p.168-174, 1999.

BAGARELO, V.; FERRO, V.; PROVENZANO, G.; PUMO, D. Evaluating pressure losses in drip-irrigation lines. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v.123, n.1, p.1-7, 1997.

BEHOTEGUY, D. & THORNTON, J.R., 1980. Operation and Installation of a Bubbler Irrigation System. Paper No. 60-2059, American Society of Agricultural Engineers. 16pages.

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

BERNARDO, S.; SOARES, A.A; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8.ed. Viçosa: Editora UFV, 2008. 625p.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. Manual de irrigação. 8. ed. 2º Reimpressão. Viçosa: UFV, 2009. 596 p

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

BUCKS, A. D.; MYERS, L. E. Trickle Irrigation: application uniformity from simple emitters. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 16, n. 6, p. 11108-1111, 1973.

CHRISTIANSEN, J.E. *Irrigation by sprinkling*. Berkley: University of California, 1942. 124 p.

CHRISTOFIDIS, Demetrios. “Água um desafio para a sustentabilidade do setor agropecuário”, *AGRIANUAL-2007*, FNP, São Paulo, 2007, p. 39 a 40.

CLEMMENS, A. J.; SOLOMON, K. H. Estimation of global irrigation distribution uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v 123, n.6, p. 454-461, 1997.

COELHO, E.A.C. et al. Associação entre gravidez não planejada e o contexto socioeconômico de mulheres em área da Estratégia Saúde da Família. *Acta paul. enferm.*, 89 São Paulo, v. 25, n. 3, p. 415-22, 2012.

CURTIS, L. M.; POWELL, A. A.; TYSON, T. W. Microirrigation of peaches in the southeast. *Irrigation Journal*, New York, v.46, n.2, p. 22, maio 1996.

DAKA, A.E. Experiences with micro agricultural water management technologies: Zambia. International Water Management Institute (IWMI): Southern Africa Sub-Regional Office. Pretória, África do Sul, 40p., 2006.

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.

DUTRA, I. Distribuição da água e avaliação da salinidade no solo em cultivo de goiabeira irrigado por sistema localizado de baixa pressão. 2002. 73 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem)-Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

FAVETTA, G.; BOTREL, T.A. Uniformidade de sistemas de irrigação localizada: validação de equações. *Scientia agrícola*, v.58,n.2, p.427-430, abr./jun. 2001. Disponível em: www.scielo.br/pdf/sa/v58n2/4438.pdf. Acesso em: 9 de agosto 2007.

GIL, M. RODRIGUES-SINOBAS, L. JUANA, L. SANCHEZ, R. LOSADA, A. Emitter discharge variability of subsurface drip irrigation in uniform soils: effect on water-

application uniformity. *Irrigation Science*. Madrid, v. 26, n. 6, p. 451-458. 2008.

GOMES, H. P. Engenharia de Irrigação–hidráulica dos sistemas pressurizados, aspersão e gotejamento. 3.ed. Campina Grande: UFPB, 1999, 412p.

GRAH, V. F. Desenvolvimento de um sistema hidráulico-mecânico para o acionamento sequenciado da irrigação por aspersão em malha. 2011. 67 p. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz". Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2011.

SCHUSTER, H. D. M. SRINIVASAN V. S. J. L. RABELO, **F. F. da Silva**. Uma Investigação dos Efeitos Hidráulicos de Barragens Submersas num Aquífero Aluvial na Região Semi-árida da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol 9, no 03, pg 55-68. Julho/Set de 2004.

HOWELL, T.A.; HILLER, E.A. Designing trickle irrigation laterals for uniformity. In: INTERNATIONAL DRIP IRRIGATION CONGRESS, 2., 1974, San Diego. *Proceedings...* Riverside: Department of Soil Science and Agricultural Engineering, 1974. p.299-304.

Hull, J. G. A self-awareness model of the causes and effects of alcohol consumption. *Journal of Abnormal Psychology*, 1981, 90, 586-600.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Agropecuário 2006. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/censoagro/agri_familiar_2006/familia_censoagro2006. Acessado em: 12 de abril de 2016.

Instituto Nacional do Semiárido. Sinopse do Censo Demográfico para o Semiárido Brasileiro. Acessado em: 12 de abril de 2016.

KARMELI, D. Classification and flow regime analysis of drippers. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v.22, p.165-173, 1977.

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

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

KELLER, Modern irrigation in developing countries. *Proceedings 14th International Congress of Irrigation and Drainage*, Rio de Janeiro, Brazil, International Commission of Irrigation and Drainage, 1-E, p.113-138.1990.

LIDCO. 1985. LIDCO Announces the Bubbler Irrigation System. Advertising pamphlet. Brawley, California.

LIMA, V. L.A . Caracterização hidráulica de tubulaçõeslaterais em microaspersão utilizando microtubos comodissipadores de energia . Campina Grande - UFPB, 1991.11p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)- Universidade Federal da Paraíba, 1991.

LUIS, F. N. T. Relações Físico-Hídricas em Solos de Várzea do Baixo Curso do Rio Apodi-Mossoró/RN. Monografia (Especialização em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1990.

MANTOVANI, E. C. AVALIA: Programa de Avaliação da Irrigação por Aspersão e Localizada. Viçosa, MG: UFV, 2001.

MANTOVANI, E.C.; BERNARDO, S.; POLARETTI, L.F. Irrigação: princípios e métodos. 3. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 355p.

MAREK, T. U.; UNDERSANDER, D. J.; EBELING, L. L. Na aerial weighted uniformity coeficiente for pivot irrigation systems. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v. 29, n. 6, p. 1665-1670, 1986.

MATOS, J. A.; DANTAS NETO, J.; AZEVEDO, C. A. V.; AZEVEDO, H. M. Avaliação da distribuição de água de um microaspersor autocompensante. Revista Irriga, Botucatu, v.4, n.3, p. 168-174, 1999.

MEDEIROS, J.F.; FERREIRA NETO, M.; LEMOS, M.; LIRA, R.B. Sistema localizado de baixa pressão para irrigação de palma forrageira utilizando água de esgoto tratada. In: INOVAGRI INTERNATIONAL MEETING, 2. 2014, Fortaleza. Anais...Fortaleza: INOVAGRI, 2014. 1 CD.

MERRY, D. J.; NAMARA, R.; DE LANGE, M. Agricultural water management technologies for small scale farmers in Southern Africa: an inventory and assessment of experiences, good practices and costs. International Water Management Institute, Pretoria, South Africa. 105 p., 2006.

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

NAKAYAMA, K., & SILVERMAN, G. H. (1986). Serial and parallel processing of visual feature conjunctions. Nature, 320, 264–265.

NIMAH, M., 1985. Localized versus drip irrigation system. Proceedings of the third drip irrigation congress, Fresno, California, USA., pp552-554.

OLIVEIRA, A.M. de 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.483-6, 2000.

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

PACHICO, I.W.L. 2014. 67p. Avaliação de sistemas de irrigação localizada de baixo custo recomendado a pequenos agricultores da região Semi-Árida. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) – Universidade Federal Rural do Semi-Árido, Mossoró – RN, 2014.

PEREIRA, L.S. Necessidades de água e métodos de rega. Lisboa: Pub. Europa-América, 2004. 313 p.

PHOCAIDES, A. Handbook on pressurized irrigation techniques. 2º ed. FAO: Roma, 282p., 2007.

PIZARRO, F. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión, exudación. 2.ed. Madrid: Ediciones MundiPrensa, 1990, 471p.

Pizarro-Cabello, F. Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): Goteo, microaspersión, exudación. 3.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513p.

RAWLINS SL. 1977. Uniform irrigation with a low head bubbler systems. *Agriculture Management* 1: 167-168.

RAWLINS, S.L. Uniform irrigation with a low head bubbler system. *Agriculture and Management*, Amsterdam, v.1, n.1, p.167-78, 1977.

REYNOLDS, C.; YITAYEW, M. Low-head bubbler irrigation systems. Part II. Air lock problems. *Agricultural Water Management*, Tucson, n.29, p.25-35, 1995.

REYNOLDS, C.A. Design and evaluation of bubbler irrigation systems. 1993. 134 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação) - University of Arizona, Arizona, 1993.

REYNOLDS, C.A; YITAYEW, M.; PETERSEN, M. Low-head bubbler irrigation systems. Part I: Design. *Agricultural Water Management*. Amsterdam, v.29, n.1, p.1-24, 1995.

RIBEIRO, T.A.P.; AIROLDI, R.P.S.; PATERNIANI, J. E. S.; SILVA, M.J.M. Variação temporal da qualidade da água no desempenho de filtros utilizados na irrigação por gotejamento. *Rev. bras. eng. agríc. ambient.* [online]. 2005, vol.9, n.4, pp. 450-456. ISSN 1807-1929. <http://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662005000400002>.

RODRIGO LÓPEZ, J.; HERNÁNDEZ ABREU, J.M.; PEREZ REGALADO, A.; GONZALEZ HERNANDEZ, J.F. Riego localizado. MAPA-YRIDA, Ediciones MundiPrensa, Madrid, 405p., 1992.

SANTOS, R. A.; HERNANDEZ, F. B. T.; FERREIRA, E. J. S.; VANZELA, L. S.; LIMA, R. C. Uniformidade de distribuição de água em irrigação por gotejamento em sub-superfície instalado na cultura de pupunheiras (*Bactris gasipaes* H. B. K.). In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 32, 2003, Goiânia. [Anais eletrônicos...]. Acesso em: 19 abril. 2016.

SCALOPPI, E. J. Características dos principais sistemas de irrigação. *ITEM – Irrigação e Tecnologia Moderna*, n.25, p.22-27, 1986.

SIJALI, I.V. Drip irrigation: options for smallholder farmers in Eastern and Southern Africa. *Technical Handbook*, n.24. Regional Land Management Unit, 54p., 2001.

SILVA, C. A.; SILVA, C. J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação

- localizada. Revista Científica Eletrônica de Agronomia, Garça, n.8, dez. 2005.
- SOARES, J. M. Sistemas de irrigação por mangueiras. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA, 1986, 130p.
- SOLOMON, K. Manufacturing variation of trickle emitters. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.22, n.5, p.1034-1038, 1979.
- SOUZA, I. H. Avaliação do sistema de irrigação bubbler e do crescimento inicial do cajueiro anão precoce submetido a diferentes níveis de umidade de solo. 2001. 94 f. Dissertação (Mestrado em Irrigação e Drenagem) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2001.
- SOUZA, I. H.; Andrade, E. A.; Costa, E. M.; Silva, E. L. Avaliação de um sistema de irrigação localizada de baixa pressão, projetado pelo software BUBBLER. Revista Engenharia Agrícola, v.25, p.264-271, 2005.
- SOUZA, M. R. (2001) – A Implantação do Sistema de Gestão Ambiental Segundo ISO 14001 Dissertação de Mestrado do programa da Escola Federal de Engenharia de Itajubá.
- VERMEIREN, L., JOBLING, G.A. Irrigação localizada. Tradução de H.R. Gheyi, F.A.V. Damasceno, L.G.A. Silva Jr., J.F. de Medeiros, Campina Grande, UFPB, 1997. 184p. (Estudos FAO: Irrigação e Drenagem, 36).
- WAHEED, S. I. Design criteria for low-head bubbler system. Tucson: University of Arizona (Tese de mestrado). 1990.
- WILCOX, J. C.; SWAILES, G. E. Uniformity of water distribution by some undertree orchard sprinklers. Scientific Agriculture, Ottawa, v. 27, n. 11, p. 565-583, 1947.
- WOLTERING L, IBRAHIM A, PASTERNAK D, NDJEUNGA J. The economics of low pressure drip irrigation and hand watering for vegetable production in the Sahel. Agric Water Manage. 2011;99(1):67–73.
- WU, I.P.; GITLIN, H.M. Hydraulics and uniformity for drip irrigation. Journal of Irrigation and Drainage Division, v.99, n. IR3, p. 157-168, 1973.
- YITAYEW, M.; DIDAN, K; REYNOLDS, C. Microcomputer based low-head gravity-flow bubbler irrigation system design. Computers and Electronics in Agriculture. Amsterdam, v.22, p. 29-39, 1999.

APÊNDICE A – Memorial de cálculo

Cálculo do tempo de irrigação

Utilizando a Equação 14, calculou-se o tempo de irrigação, arbitrando valores de comprimentos de 2,0, 2,5 e 3,0 m para os sulcos.

- Para comprimento de sulco $E_1 = 2,0$ m temos:

$$\begin{aligned}Tirr &= \left(\frac{a.(60.h.E2)^b .E1^{b-1}}{4^c} \right)^{\frac{1}{b-c}} = \\&= \left(\frac{0,0825.(60.3,5.3,0)^{0,55} .2,0^{0,55-1}}{4^{0,21}} \right)^{\frac{1}{0,55-0,21}} = \\&= \left(\frac{0,0825.(6630)^{0,55} .2,0^{-0,45}}{0,536} \right)^{2,94} = \\&= \left(\frac{2,86.2,0^{-0,45}}{0,536} \right)^{2,94} = \\&= 137,7 . 2,0^{-1,323} = \\&= 55,00 \text{ min.}\end{aligned}$$

- Para comprimento de sulco $E_1 = 2,5$ m temos:

$$\begin{aligned}Tirr &= 137,7 . 2,5^{-1,323} = \\&= 41,00 \text{ min.}\end{aligned}$$

- Para comprimento de sulco $E_1 = 3,0$ m temos:

$$\begin{aligned}Tirr &= 137,7 . 3,0^{-1,323} = \\&= 32,20 \text{ min.}\end{aligned}$$

Cálculo da vazão

Para os comprimentos dos sulcos de 2,0; 2,5 e 3,0 m, temos as seguintes vazões:

Tabela 9. Tempo de irrigação para aplicação de uma lâmina mínima de irrigação de 3,5 mm e vazões dos emissores para cada três comprimento de sulcos

E1 (m)	Tirr (min)	q (L h⁻¹)
2,0	55,4	23,0
2,5	41,0	38,4
3,0	32,2	58,7

Considerando que maiores comprimentos de sulco implicam em menos emissores por área, assumiu-se o comprimento de sulco de 3,0 m

Assumindo o comprimento do sulco de 3,0, cuja vazão é de 58,7 L h⁻¹, o emissor confeccionado a partir de microtubo de $\phi = 4,0$ mm e operando sob pressão de 2,3, sendo o comprimento calculado pela Equação 19 será de:

$$q = 10^{1,728.C^{-0,168}} \cdot H^{0,533} =$$

$$58,7 = 10^{1,728.C^{-0,168}} \cdot 2,3^{0,533} =$$

$$10^{1,728.C^{-0,168}} = \frac{58,7}{2,3^{0,533}} =$$

$$10^{1,728.C^{-0,168}} = 37,66 =$$

$$1,728 \cdot C^{-0,168} = \log 37,66 =$$

$$C = \left(\frac{1,576}{1,728} \right)^{\frac{-1}{0,168}} =$$

$$C = 1,73 \text{ m.}$$

Cálculo das Perdas de Cargas

Para a linha 01 que contém 10 microtubos, a qual difere das demais linhas em relação ao número de microtubos. Admitiu-se a linha 03 como parâmetro, para padronizar o sistema de irrigação.

Primeiro trecho da Linha 01 - $\theta \frac{3}{4}$ ": (01 par de espaguetes)

- Cálculo da velocidade:

Tabela 10 – Resumo das perdas de cargas do protótipo instalado

Trecho	Comp. Eq. (m)	D (mm)	Q (m ³ s ⁻¹)	N° saídas	F	Hf (m)	
Linha Principal	47,80	25,40	0,000225	1	1,000	0,2300	
Linhas Secundárias 1 e 2	trecho 1-2	18,10	25,40	0,000235	1	1,000	0,0940
	trecho 2	9,10	25,40	0,000238	1	1,000	0,0480
	trecho 3	9,10	25,40	0,000225	1	1,000	0,0440
	trecho 3-4	18,10	25,40	0,000201	1	1,000	0,0730
Linha Lateral 1	trecho 1	9,80	19,05	0,000235	3	0,519	0,1030
	trecho 2	6,02	12,70	0,000094	2	0,625	0,0047
Linha Lateral 2	trecho 1	9,80	19,05	0,000238	3	0,519	0,1061
	trecho 2	6,02	12,70	0,000119	3	0,519	0,1387
Linha Lateral 3	trecho 1	7,39	19,05	0,000225	2	0,625	0,0895
	trecho 2	11,47	12,70	0,000150	4	0,469	0,3500
Linha Lateral 4	trecho 1	10,70	19,05	0,000201	3	0,519	0,0869
	trecho 2	10,82	12,70	0,000101	3	0,519	0,1858

Cálculo da perda de carga total do sistema de irrigação instalado ligando uma linha por vez.

Ligando a linha 01

$$hf_{TS01} = hf_{linha\ 01} + hf_{linha\ de\ derivação} + hf_{linha\ principal} =$$

$$hf_{TS01} = 0,1079 + 0,094 + 0,2305 = 0,4324\ m$$

Ligando a linha 02

$$hf_{TS02} = hf_{linha\ 02} + hf_{linha\ de\ derivação} + hf_{linha\ principal} =$$

$$hf_{TS02} = 0,2448 + 0,048 + 0,2305 = 0,5233\ m$$

Ligando a linha 03

$$hf_{TS03} = hf_{linha\ 03} + hf_{linha\ de\ derivação} + hf_{linha\ principal} =$$

$$hf_{TS03} = 0,4394 + 0,044 + 0,2305 = 0,7139\ m$$

Ligando a linha 04

$$hf_{TS04} = hf_{linha\ 04} + hf_{linha\ de\ derivação} + hf_{linha\ principal} =$$

$$hf_{TS04} = 0,2727 + 0,073 + 0,2305 = 0,5762\ m$$