

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

Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia

Acácio Perboni

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas**

**Piracicaba
2016**

Acácio Perboni
Engenheiro Agrônomo

Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:

Prof. Dr. **JOSÉ ANTONIO FRIZZONE**

Coorientador:

Prof. Dr. **RUBENS DUARTE COELHO**

**Tese apresentada para obtenção do título de Doutor em
Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas**

**Piracicaba
2016**

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

Perboni, Acácio

Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia / Acácio Perboni. - -
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2016.
71 p. : il.

Tese (Doutorado) - - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Microirrigação 2. Partículas sólidas inertes 3. Granulometria 4. Concentração
I. Título

CDD 631.7
P427s

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

DEDICATÓRIA

In memoriam a minha mãe Teresinha. Dedico esta tese a sua força de vontade para lutar durante cinco anos contra o câncer.

AGRADECIMENTOS

A ESALQ/USP pelo ótimo curso de pós-graduação.

A CAPES pela bolsa de estudos.

Ao Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), pelo apoio financeiro a esta pesquisa, através do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia da Irrigação (INCT-EI).

Ao Prof. Dr. José Antonio Frizzone, pela orientação e exemplos de dedicação e profissionalismo.

A equipe do INCT-EI: Dr. Antonio Pires de Camargo, Me. Ezequiel Saretta, Eng. Rogério Lavanholi, Me. Fabrício Correia de Oliveira, Me. Hermes Soares da Rocha, Eng. Douglas Reis pelo apoio técnico e intelectual no desenvolvimento e montagem da bancada automatizada e na realização dos ensaios de obstrução.

Ao Prof. Dr. Rubens Duarte Coelho, pela coorientação.

A todos os professores e funcionários do departamento de Engenharia de Biosistemas, pela formação, auxílios e dicas.

A todos os colegas de pós-graduação pelo convívio e bons momentos que passamos juntos.

*“Dê-me seis horas para cortar uma árvore e passarei
as primeiras quatro afiando o machado”*

(Abraham Lincoln)

SUMÁRIO

RESUMO	11
ABSTRACT	13
LISTA DE FIGURAS.....	15
LISTA DE TABELAS.....	17
LISTA DE SÍMBOLOS.....	19
1 INTRODUÇÃO.....	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	23
2.1 Obstrução de gotejadores	23
2.2 Obstrução de gotejadores causada por partículas sólidas.....	24
2.2.1 Obstrução de gotejadores causada por partículas sólidas: areia	25
2.3 Avaliação de gotejadores novos e de gotejadores sob condição de risco de obstrução.....	26
2.4 Metodologias laboratoriais para avaliação da sensibilidade à obstrução causada por partículas sólidas.....	27
2.5 Bancada automatizada para monitoramento de vazão em ensaios de obstrução.....	29
2.6 Transporte e deposição de sedimentos em linhas laterais	30
2.7 Efeito do “flushing”	31
2.8 Efeito da linha de derivação na distribuição das partículas em suspensão nas linhas laterais de gotejamento.....	31
2.9 Tratamento de água para ensaios de obstrução por partículas de areia.....	32
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Generalidades	37
3.2 Projeto hidráulico da bancada.....	38
3.3 Análise estatística da distribuição de vazão na bancada	40
3.3.1 Pressupostos da análise de variância e comparação de médias	41
3.4 Automação da bancada de ensaios.....	42
3.4.1 Ajuste de equações dos transdutores de pressão.....	44

3.5	Análise de incerteza do sistema de medição de vazão	45
3.6	Avaliação da bancada automatizada para ensaios de obstrução de gotejadores.....	46
3.7	Avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas inertes	47
3.8	Critérios para avaliação da sensibilidade de gotejadores a obstrução por partículas sólidas inertes	48
3.9	Experimentos para avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas inertes	49
3.10	Qualidade da água utilizada nos ensaios de obstrução por partículas de areia.....	50
3.11	Avaliação da obstrução dos gotejadores.....	52
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	Análise de incerteza do sistema de medição de vazão	55
4.2	Uniformidade de vazão entre linhas laterais.....	56
4.3	Análise gráfica da variabilidade e desvio das indicações de vazão	57
4.5	Obstrução dos gotejadores por partículas de areia.....	58
4.5.1	Efeito da obstrução no coeficiente de variação de vazão (CVq)	61
4.5.2	Efeito do tratamento na obstrução dos gotejadores.....	62
5	CONCLUSÕES	65
	REFERÊNCIAS.....	67

RESUMO

Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia

Os fatores envolvidos na obstrução dos gotejadores são divididos em químicos, físicos e biológicos, os quais, dependem da qualidade da água utilizada na irrigação e dos adubos utilizados em fertirrigação. Dentre os fatores físicos estão as partículas de areia, que são classificadas como sólidas inertes, pois não sofrem agregação com outras partículas já presentes na água e nem dispersão. O objetivo deste trabalho foi avaliar a influência do tamanho e concentração de partículas de areia e da velocidade de escoamento da água nas linhas laterais na obstrução de um único modelo de gotejador do tipo cilíndrico, não regulado, com vazão nominal de 2 L h^{-1} . Foram realizados ensaios de obstrução com areia misturada em água destilada, combinando os seguintes fatores: três faixas granulométricas de partículas de areia (53-105; 105-250 e 250-500 μm), três concentrações de areia na água destilada (100, 250 e 500 mg L^{-1}) e três velocidades de escoamento da água no início das linhas laterais (0,13; 0,25 e 0,94 m s^{-1}). O tempo de ensaio para cada combinação de fatores foi de 48 horas. A vazão de 32 gotejadores foi medida a cada doze minutos por meio de um sistema automatizado desenvolvido durante esta pesquisa, sendo que esse operou adequadamente durante todo o período de ensaios de obstrução. Utilizaram-se oito linhas laterais conectadas em linha de derivação com bifurcações simétricas, cuja finalidade era distribuir uniformemente a água as partículas de areia entre as linhas laterais. Em ensaios com faixa granulométrica de 105 a 250 μm , ocorreu a obstrução nas concentrações de 250 e 500 mg L^{-1} , para as velocidades de escoamento da água no início das linhas laterais V2 (0,25 m s^{-1}) e V3 (0,94 m s^{-1}). Já na faixa granulométrica de 250 a 500 μm , ocorreu obstrução nas concentrações de 100, 250 e 500 mg L^{-1} , para V2 e V3. A obstrução de gotejadores ocorreu de forma aleatória nas oito linhas laterais. Após obstruídos os gotejadores não desobstruíram com o passar do tempo de ensaio, portanto fenômenos de auto-limpeza não foram observados durante os experimentos.

Palavras-chave: Microirrigação; Partículas sólidas inertes; Granulometria; Concentração

ABSTRACT

Sensitivity of drippers to clogging caused by sand particles

Clogging of emitters is influenced by chemical, physical and biological agents that are associated with irrigation water quality and fertilizers, in case of adoption of fertigation practices. Among the physical agents, sand particles are one of the most important clogging sources. Sand particles are considered to be inert since it does not aggregate with other particles suspended in water. The purpose of this research was to assess influence of concentration, size of sand particles, and flow velocity within laterals on sensitivity of drippers to clogging. The results are limited to a cylindrical integrated dripper of 2 L h^{-1} nominal flow rate that is a non-pressure compensating emitter. Experiments were undertaken using distilled water and sand particles. The following levels were evaluated: (a) three ranges of particles sizes (0.053-0.105; 0.105-0.25 and 0.25-0.5 mm); (b) three concentrations of particles (100, 250 and 500 mg L^{-1}); and, (c) three flow velocities at the laterals inlet (0.13, 0.25 and 0.94 m s^{-1}). Each testing level had 48 hours duration. The flow rate of 32 drippers was measured every 12 minutes by an automated system developed and successfully validated during this research. A manifold with symmetrical bifurcations was designed to assure uniform water distribution among eight parallel laterals installed on the testing bench. Within the range of particle sizes from 105 to $250 \mu\text{m}$, clogging of emitters was observed under concentration of particles of 250 and 500 mg L^{-1} and under flow velocities of 0.25 and 0.94 m s^{-1} . Within the range of particles sizes from 250 to $500 \mu\text{m}$, clogging was observed under all concentrations and under flow velocities of 0.25 and 0.94 m s^{-1} . Apparently, clogging of emitters of the eight laterals occurred randomly. Once clogged, emitters did not recovered its initial flow rate, therefore self-cleaning phenomena was not observed during the experiments.

Keywords: Micro irrigation; Inert solid particles; Particle size; Concentration

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Esquemas de linha de derivação: a) com bifurcações e b) consecutivo. Fonte: Adaptado de Wang (2011)	32
Figura 2 - Dissociação do ácido hipocloroso versus pH. Fonte: The Nalco Water Handbook (2009)	33
Figura 3 - Retângulos vermelhos indicam: A) Entrada de água no labirinto do gotejador; B) Pré-filtro antes do labirinto do gotejador.....	37
Figura 4 - Gotejadores avaliados nos ensaios de obstrução	38
Figura 5 - Esquema hidráulico da bancada de ensaios de obstrução	39
Figura 6 - A) Modelos de bocais avaliados; B) Bancada de ensaio de microaspersor; C) Bancada de ensaio de bocais de aspersor	40
Figura 7 - A) Linha de derivação com bifurcações simétricas com 8 linhas laterais; B) Ensaio de divisão de vazão nas linhas laterais conectadas na linha de derivação; C) Conexão dos bocais de microaspersor no final das linhas laterais.....	41
Figura 8 - A) Bancada automatizada para ensaios de obstrução. B) Coletor (1) equipado com válvula solenoide do tipo pinça (2) e transdutor de pressão (3).....	42
Figura 9 - A) Módulo microprocessado para aquisição de dados; B) Módulo microprocessado para controle de válvulas.....	43
Figura 10 - Aplicativo supervisorio	44
Figura 11 - A) Agitador mecânico; B) Areia separada em faixas de diâmetro de partículas ..	47
Figura 12 - Formato das partículas de areia	48
Figura 13 - Volume de HCl 37 % para abaixamento do pH de 10 litros de água destilada	51
Figura 14 - Contribuição do diâmetro, tempo e do nível na incerteza total.....	56
Figura 15 - A) Vazão média nas linhas laterais; B) Número de Reynolds	57
Figura 16 - Análise gráfica da variabilidade e desvio das indicações de vazão.....	58
Figura 17 - Razão de vazão dos gotejadores para as combinações de granulometrias de partículas (G1, G2 e G3), velocidades de escoamento (V1, V2 e V3) e concentrações de partículas (C1, C2 e C3).....	59
Figura 18 - A) Acúmulo de areia nos tubos gotejadores durante ensaio na V1. B) Obstrução do pré-filtro do gotejador ocasionada por partículas da granulometria 3, na V3.....	60
Figura 19 - Coeficiente de variação de vazão versus tempo	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Velocidade de escoamento da água no tubo, abaixo da qual ocorre deposição de partículas	31
Tabela 2 - Quantidade de cloro para reação e efeito na alcalinidade	33
Tabela 3 - Valores de referência para cálculo do pHc	34
Tabela 4 - Coeficiente de sensibilidade	45
Tabela 5 - Incerteza padrão combinada	46
Tabela 6 - Cronograma de ensaios.....	50
Tabela 7 - Incertezas padrão e expandida da estimativa de vazão	55
Tabela 8 - Valores P das análises de variância e comparação de médias	56
Tabela 9 - Coeficiente de variação de vazão inicial	61
Tabela 10 - Número de gotejadores obstruídos em cada tratamento.....	62

LISTA DE SÍMBOLOS

- q - vazão, em $L h^{-1}$;
 p - pressão hidráulica, em kPa;
 K - coeficiente de descarga característico do emissor, adimensional;
 m - expoente de descarga do gotejador, adimensional;
 CV_f - coeficiente de variação de fabricação do gotejador, porcentagem;
 S_q - desvio padrão das vazões da amostra, em $L h^{-1}$;
 \bar{q} - vazão média da amostra, em $L h^{-1}$.
 CV - coeficiente de variação do gotejador, adimensional;
 $CV^2(HFO)$ - coeficiente de variação devido à combinação de efeitos hidráulicos, variação de fabricação e obstrução dos gotejadores;
 $CV(O)$ - coeficiente de variação causado somente pela obstrução de gotejadores;
 O - porcentagem de gotejadores completamente obstruídos, em %;
 γ_q - razão entre a vazão atual e nominal dos gotejadores;
 q_{atual} - vazão atual de cada gotejador sendo avaliado, em $L h^{-1}$;
 q_n - vazão nominal dos gotejadores, em $L h^{-1}$;
 CV_q - coeficiente de variação de vazão, em porcentagem;
 F_L - fator de Durand, adimensional;
 V_D - velocidade de escoamento da água abaixo da qual ocorre deposição de partículas, em $m s^{-1}$;
 g - aceleração da gravidade, em $m s^{-2}$;
 D - diâmetro interno do tubo, em m;
 ρ_s - peso específico da partícula, em $Kgf m^{-3}$;
 ρ_L - peso específico do líquido, em $Kgf m^{-3}$;
 C_v - concentração de partículas, em base de volume;
 d_{50} - diâmetro médio das partículas, em mm;
 ISL - índice de saturação de Langelier;
 pHa - pH atual da água;
 pHc - pH teórico em que a água pode ter equilíbrio com o $CaCO_3$;
 $pK_2 - pK_c$ - somatório das concentrações de Ca, Mg e Na, em $mmol_c L^{-1}$;
 pCa - concentração de Ca, em $mmol_c L^{-1}$;
 $p(Alk)$ - somatório das concentrações de CO_3 e HCO_3 , em $mmol_c L^{-1}$;
 D - diâmetro do tubo coletor, mm;

h - altura de água no tubo de coleta, mm;

t - intervalo de tempo entre dois registros de dados, s;

c_D - coeficiente de sensibilidade de vazão em relação ao diâmetro;

c_h - coeficiente de sensibilidade de vazão em relação à altura de água nos coletores;

c_t - coeficiente de sensibilidade de vazão em relação ao intervalo de tempo de registro de dados;

$u_c(D)$ - Incerteza padrão combinada no diâmetro dos coletores, em mm;

$u_c(h)$ - Incerteza padrão combinada no nível de água nos coletores, em mm;

$u_c(t)$ - Incerteza padrão combinada no registro de dados, em s;

C - concentração de partículas de areia em suspensão na água, em mg L^{-1} ;

G - granulometria das partículas de areia, em mm;

V - velocidade de escoamento da água no início da linha lateral, em m s^{-1} ;

pH - potencial hidrogeniônico, adimensional;

HCl - ácido clorídrico;

NaOCl - hipoclorito de sódio;

C_{cd} - concentração de cloro disponível, em $\text{Kg}_{\text{Cl}_2}\text{m}^{-3}$;

m_{Cl_2} - massa de cloro disponível na solução de hipoclorito de sódio a 10%, em kg;

ρ - massa específica da solução de hipoclorito de sódio, em kg m^{-3} ;

C_{NaOCl} - concentração de hipoclorito de sódio, em kg kg^{-1} ;

V_{NaOCl} - volume da solução de hipoclorito de sódio, em m^3 ;

C_{Cl_2} - concentração de cloro, em kg m^{-3} ;

N - número de gotejadores avaliados;

q_{inicial} - vazão média dos N gotejadores determinada com água limpa na mesma pressão utilizada no ensaio de obstrução, em L h^{-1} ;

$CVq_{(\text{atual})}$ - coeficiente de variação de vazão atual, adimensional;

1 INTRODUÇÃO

A indústria de irrigação está constantemente investindo em novos modelos de gotejadores para alcançar melhores uniformidades e tem atingido esse objetivo. A norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) estabelece os requisitos para avaliação da uniformidade de vazão de gotejadores e tubo-gotejadores operando com água limpa, sendo comum que gotejadores novos apresentem coeficiente de variação de vazão inferior a 5%. Por outro lado, a água utilizada em sistemas de irrigação muitas vezes apresenta baixa qualidade, o que favorece a obstrução de gotejadores e a redução da uniformidade de distribuição de água em sistemas de microirrigação. Os fabricantes praticamente não dispõem ou não fornecem informações de desempenho de gotejadores, operando em condições de obstrução.

Os fatores envolvidos na obstrução dos gotejadores são divididos em químicos, físicos e biológicos. A obstrução por sólidos em suspensão tem sido reportada como a causa mais comum dos problemas de obstrução (ADIN; ALON, 1986; NAKAYAMA; BUCKS, 1991) e sabe-se que a qualidade da água e a geometria de gotejadores são aspectos determinantes nos processos de obstrução.

Não há atualmente norma em vigor que descreva os requisitos para avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução. Os mecanismos de obstrução são bastante complexos e ainda não há um entendimento consolidado sobre os fenômenos que atuam na obstrução dos gotejadores. Um procedimento adequado para ensaios em laboratório deve incluir os fatores predominantes no processo de obstrução e, principalmente, deve reproduzir situações de campo nas quais o material realmente opera. Também é essencial que procedimento e estruturas de ensaios propiciem adequados índices de repetitividade e reprodutibilidade, a fim de que um dado modelo de material sempre apresente resultados similares de desempenho, mesmo quando avaliado em laboratórios distintos.

Do ponto de vista dos laboratórios, um procedimento de ensaio viável tecnicamente e economicamente precisa apresentar duração curta, mas suficiente para assegurar adequada avaliação de desempenho do material. Fatores e níveis de ensaio não podem simplesmente ser arbitrados e precisam fundamentação teórica obtida através de pesquisa para que se possa estabelecer um procedimento adequado.

Limitando-se a agente físicos causadores de obstrução, ainda não está claro como o processo de obstrução ocorre e como deveria ser um protocolo para avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas. A hipótese dessa pesquisa é que a intensidade da obstrução de gotejadores é dependente do tamanho e da concentração de

partículas, da velocidade de escoamento da água na linha lateral e da interação entre esses fatores. Sendo assim, um protocolo de ensaios para avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas, deveria levar em conta os fatores apresentados.

Diante do exposto, esse trabalho foi proposto com o objetivo de avaliar a influência do tamanho e concentração de partículas de areia, e da velocidade de escoamento da água nas linhas laterais, na obstrução de gotejadores. Adicionalmente, descreve-se o desenvolvimento e validação de uma estrutura automatizada para monitoramento contínuo de vazão, a qual foi utilizada como ferramenta para condução dos experimentos de obstrução.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Obstrução de gotejadores

A obstrução de gotejadores é considerada um dos maiores problemas de manutenção em microirrigação (CAPRA; SCICOLONE, 1998; NIU; LIU; CHEN, 2012; ZHANG et al., 2010), estando diretamente associada à qualidade da água de irrigação (DURAN-ROS et al., 2009; NAKAYAMA; BUCKS, 1991). Na maioria das vezes este problema provém de filtração insuficiente, tratamento químico inadequado da água, limpeza de laterais (flushing) pouco frequente (LAMM; CAMP, 2007) ou monitoramento inadequado do comportamento hidráulico do sistema. Problemas de obstrução tem como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza física, química e biológica.

Pesquisadores relatam que mesmo após um rigoroso processo de filtração, algumas vezes são encontradas quantidades significativas de sedimentos nas linhas laterais devido a ocorrência de fenômenos de floculação e agregação de partículas finas (NIU; LIU; CHEN, 2012; BOUNOUA, 2010), bem como devido a precipitação de íons no interior da tubulação e dos gotejadores (NAKAYAMA; BUCKS, 1991). Além da filtração, a limpeza das laterais (flushing) costuma ser empregada com a intenção de remover partículas e organismos que atravessam o sistema de filtração e acumulam-se gradativamente no interior das linhas (PUIG-BARGUÉS et al., 2010). Quanto aos problemas de obstrução causados por agentes biológicos, na maioria dos casos a cloração é empregada como método para controle da população de microorganismos na água de irrigação e conseqüente redução dos problemas dessa natureza (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Já a precipitação de íons é um dos principais agentes de obstrução com origem química, que apesar de ser influenciado por inúmeros fatores, tem o pH da água como fator mais importante (LAMM; CAMP, 2007). Acerca disto, mantendo-se o pH da água de irrigação em valores inferiores a sete, a maioria dos problemas relacionados à precipitação de íons são evitados e a proliferação de microorganismos é desfavorecida (PINTO et al., 2011), porém a aplicação contínua de ácido pode promover a acidificação do bulbo molhado no solo em combinação com a fertirrigação baseada em sais de carácter ácido, o que pode tornar-se um problema agrônômico posteriormente. A obstrução de gotejadores provoca alterações hidráulicas na linha lateral e redução na uniformidade de distribuição dos gotejadores (BRALTS; WU; GITLIN, 1981), comprometendo muitos dos benefícios que poderiam ser proporcionados pela irrigação por gotejamento.

As obstruções parcial e total de gotejadores implicam na redução da uniformidade de aplicação e alterações nas características hidráulicas operacionais de todo o sistema de irrigação. Além disso, sabe-se que esses problemas podem ocorrer gradualmente ou instantaneamente (NAKAYAMA; BUCKS, 1991).

Fenômenos de auto-limpeza (self cleaning) de gotejadores são mencionados na literatura (ADIN; SACKS, 1991), sendo explicados pelo efeito combinado do deslocamento de partículas sólidas existentes na água e a operação do sistema de irrigação. Quando o sistema de irrigação é acionado, a velocidade de escoamento inicialmente elevada é capaz de carregar partículas anteriormente sedimentadas e eventualmente pode provocar uma limpeza parcial de gotejadores. Além disso, a obstrução geralmente afeta com mais intensidade os gotejadores localizados na extremidade final da lateral, região na qual as baixas velocidades de escoamento favorecem a sedimentação de partículas sólidas (CAPRA; SCICOLONE, 1998). Entretanto, a obstrução de gotejadores também é observada no início de linhas laterais, devido a agregação de partículas finas (BOUNOUA, 2010). Independentemente da natureza do problema, níveis severos de obstrução são difíceis ou impossíveis de reparar (LAMM; CAMP, 2007), sendo conveniente e estratégico detectar esses problemas em estágios iniciais de ocorrência.

A detecção da obstrução ainda é um desafio frente ao elevado número de gotejadores e a dificuldade de acompanhamento do que acontece diretamente em cada um desses gotejadores, esse desafio torna-se ainda maior em linhas laterais de gotejamento enterradas (CAMARGO et al., 2013). Qualquer que seja a origem causadora da obstrução, se o problema for identificado em estágios iniciais de ocorrência, torna-se possível executar rotinas de limpeza ou manutenção (flushing ou injeção de produtos químicos) evitando a indesejável substituição de linhas laterais e aumentando a vida útil dos sistemas de microirrigação.

2.2 Obstrução de gotejadores causada por partículas sólidas

A obstrução por sólidos em suspensão tem sido reportada como a causa mais comum dos problemas de obstrução (ADIN; ALON, 1986; NAKAYAMA; BUCKS, 1991; TAYLOR et al., 1995; LI et al., 2012). Problemas de obstrução dessa natureza são causados por partículas em suspensão que podem ser de origens inorgânicas (areia, silte, argila e plásticos), orgânicas (organismos aquáticos, zooplâncton, caramujos e peixes) e organismos não aquáticos (larvas de insetos, formigas e aranhas) (GILBERT; BUCKS; NAKAYAMA, 1979). A entrada de materiais inorgânicos em linhas laterais de irrigação pode acontecer pela sucção da bomba; no momento da montagem do sistema de irrigação; pela entrada de solo através dos gotejadores,

devido à pressão negativa criada após o sistema de irrigação ser desligado (TAYLOR et al., 1995); ou devido às rupturas na tubulação que ocasionam a entrada de solo nas linhas laterais (COELHO et al., 2007).

O processo de obstrução causado por partículas sólidas pode ocorrer de duas maneiras: a) obstrução completa, quando o tamanho da partícula é maior que a seção de passagem do emissor; b) obstrução por acúmulo de partículas, quando partículas finas são depositadas gradualmente na tubulação ou no interior de gotejadores, essa deposição geralmente ocorre no final da linha lateral e próximo à entrada do labirinto do gotejador (GILBERT; BUCKS; NAKAYAMA, 1979; BOUNOUA, 2010; NIU; LIU; CHEN, 2012). A principal técnica para controlar a obstrução causada por partículas sólidas é a utilização de filtros (ADIN; ELIMELECH, 1989).

2.2.1 Obstrução de gotejadores causada por partículas sólidas: areia

Durante 4 anos, Gilbert et al. (1981) avaliaram oito modelos de gotejadores em distrito de irrigação localizado no Arizona usando água proveniente do rio Colorado. Foram comparados seis métodos de filtração combinados com tratamento químico de água para prevenir a obstrução de gotejadores. Na fase de avaliação da uniformidade de irrigação constataram que 55% das obstruções de gotejadores foram causadas por fatores físicos, dos quais 26% estavam associados a partículas de plástico e 17% a partículas de areia.

No estudo sobre obstrução de cinco modelos de gotejadores em condições de campo utilizando três tipos de água (potável filtrada, de reuso filtrada e de reuso não filtrada) realizado por Taylor et al. (1995), foi verificado que a areia é depositada de forma aleatória na rede de linhas laterais de irrigação e que essas partículas são a causa primária da obstrução dos gotejadores. Os autores observaram que partículas de areia com faixa granulométrica de 360-1080 μm foram a causa da obstrução de 207 dos 211 gotejadores obstruídos examinados. Concluíram ainda que em 79% dos gotejadores obstruídos do tratamento que utilizava água potável filtrada, a areia era a única causa visível da obstrução dos gotejadores.

A areia é adequada para ensaios de obstrução de gotejadores, pela estabilidade física e química que o dióxido de silício apresenta. Ao utilizar partículas de outros materiais pode ocorrer floculação e cimentação entre materiais e conseqüentemente a expansão de seus volumes com a hidratação, tornando-se particulados de diâmetro superior ao inicial (FARIA, 2013). Considerada inerte, a areia não sofre agregação e dispersão, sua capacidade de troca de cátions é menor que $0,1 \text{ mmolc Kg}^{-1}$.

2.3 Avaliação de gotejadores novos e de gotejadores sob condição de risco de obstrução

Na norma ABNT NBR ISO 9261 (2006) são apresentados os requisitos para obtenção da relação vazão-pressão (eq. 1) e do coeficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação, CV_f , (eq. 2) de gotejadores e tubo-gotejadores novos. A norma especifica que 25 gotejadores escolhidos ao acaso de um lote de pelo menos 500 unidades são necessários para conduzir os testes de uniformidade de vazão. Para gotejadores regulados também é necessário realizar uma rotina de condicionamento antes dos ensaios hidráulicos. O coeficiente de variação de fabricação de gotejadores (CV_f) é calculado pela eq. (2), sendo que a amostra é considerada aceitável em termos de uniformidade de vazão se o valor do CV_f não ultrapassar 7%.

$$q = K p^m \quad (1)$$

em que,

q - vazão;

p - pressão hidráulica;

K, m - coeficientes característicos do emissor.

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

em que,

S_q - desvio padrão das vazões da amostra, em $L h^{-1}$; e

\bar{q} - vazão média da amostra, em $L h^{-1}$.

A variação de vazão dos gotejadores causada por sua obstrução é um fator bastante estudado. Segundo Yildirim (2009) o efeito combinado das variações devido às causas hidráulicas, variação de fabricação e obstrução na uniformidade de distribuição foi descrito inicialmente em Bralts, Wu e Gitlin (1981) e expresso matematicamente por Wu (1997), conforme eq. (3).

$$CV^2(HFO) = \frac{CV^2(HF)}{1 - O} + \frac{O}{1 - O} \quad (3)$$

em que,

$CV^2(HFO)$ - coeficiente de variação devido à combinação de efeitos hidráulicos, variação de fabricação e obstrução dos gotejadores.

A obstrução parcial é difícil de avaliar, sendo que na eq. (3) é considerada somente a porcentagem de gotejadores completamente obstruídos (O). Caso os coeficientes de variação

de vazão devido aos efeitos hidráulicos e de fabricação da eq. (3) sejam zero [$CV(HF)=0$], o coeficiente de variação causado somente pela obstrução de gotejadores $CV(O)$ pode ser expresso pela eq. (4).

$$CV(O) = \sqrt{\frac{O}{1-O}} \quad (4)$$

Analisando as equações 3 e 4 conclui-se que a obstrução afeta bastante a uniformidade, visto que, com 5 a 10% de obstrução, o coeficiente de uniformidade varia de 23 a 33% e isso é muito maior que as variações devido às causas hidráulicas e de fabricação do gotejador (YILDRIM, 2009).

Analisando-se gotejadores individualmente, considera-se um gotejador obstruído quando a vazão coletada é inferior a 75% da vazão nominal do gotejador (WEI et al., 2008; ZHANG et al., 2010; NIU; LIU; CHEN, 2012).

Analisando um lote de dado modelo de gotejador, em que 25 gotejadores são avaliados, considera-se que houve obstrução quando γ_q for inferior a 75, sendo esse índice determinado, conforme eq. (5) (QINGSONG et al., 2008).

$$\gamma_q = 100 \frac{\sum_{i=1}^{25} q_{\text{atual}}}{25 q_n} \quad (5)$$

em que,

γ_q - razão entre a vazão atual e nominal dos gotejadores;

q_{atual} - vazão atual de cada gotejador sendo avaliado; e,

q_n - vazão nominal dos gotejadores.

2.4 Metodologias laboratoriais para avaliação da sensibilidade à obstrução causada por partículas sólidas

Não há atualmente norma em vigor que descreva os requisitos para avaliação da sensibilidade de gotejadores a obstrução. Os processos de obstrução são bastante complexos e ainda não há um entendimento consolidado sobre os fenômenos que atuam na obstrução dos gotejadores.

Na literatura encontra-se dois tipos de trabalhos de pesquisa que avaliaram a obstrução de gotejadores por partículas em laboratório: o primeiro utiliza apenas partículas de areia e o segundo uma mistura de partículas de areia com um ou mais tipos de materiais, por exemplo, argila, silte e sulfato de alumínio.

Wei et al., (2008) propuseram um procedimento de curta duração para avaliar a obstrução de gotejadores com areia. O teste constitui-se de oito etapas com diferentes granulometrias de areia, duração de cinquenta minutos e avaliação dos gotejadores nos últimos dois minutos de cada etapa, ao término de cada etapa a motobomba era desligada por 30 minutos para simular o funcionamento intermitente da microirrigação. Iniciaram a primeira etapa do teste com concentração de 250 mg L^{-1} de areia com tamanho de partículas na faixa de 45 a $106 \mu\text{m}$, em cada etapa subsequente adicionava-se 250 mg L^{-1} de areia com tamanho de partículas especificado na norma ISO 8486-1 (1996). Experimentos de curta duração tem menor custo e necessitam menos mão de obra, porém o aumento de concentração a cada cinquenta minutos, não permite separar os efeitos de tempo de exposição e de concentração. Dos três modelos de gotejadores ensaiados Wei et al., (2008) dois obstruíram quando a concentração era maior que 1000 mg L^{-1} e um não obstruiu, nem quando a concentração de partículas estava em 2000 mg L^{-1} .

Com objetivo de propor norma para ensaios de obstrução de gotejadores de grande porte, Faria (2013) utilizou três faixas granulométricas de areia: 50-100; 100-250 e 250-500 μm e concentrações de 125 e 500 mg L^{-1} para cada faixa. O tempo de ensaio adotado foi de 8 horas diárias e um total de dez dias para cada combinação de granulometria e concentração. Nos finais de semana o sistema permaneceu desligado. De uma só vez foram ensaiados 12 modelos de tubos gotejadores de seis diferentes fabricantes, dispostos em diferentes posições na linha de derivação. A principal vantagem de experimento de grande porte é a avaliação de grande número de modelos permitindo que o pesquisador compare esses modelos. Como desvantagens pode-se citar a dificuldade de automação e a necessidade de posicionar as linhas laterais em diferentes posições da linha de derivação com bifurcações não simétricas, já que essa não distribui a vazão igualmente entre as linhas laterais.

Niu, Liu e Chen (2012) avaliaram a sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por uma mistura de partículas finas (diâmetro inferior a 0,1 mm) contendo areia fina, silte e argila. Realizaram ensaios em oito etapas, uma para cada faixa de tamanho de partículas. A duração adotada para cada etapa foi de 30 minutos em operação e seis horas de interrupção antes do início da próxima etapa. Após o final de cada etapa era adicionada uma nova faixa de tamanho de partículas com concentração pré-estabelecida. Concluíram que: 1) partículas finas se depositam em locais do labirinto do gotejador, similares ao das partículas maiores, em geral na entrada e cantos do labirinto; 2) O tamanho e concentração de partículas são os fatores que mais afetam a obstrução. Se o tempo de irrigação é curto, concentrações de partículas menores que $1,25 \text{ g L}^{-1}$ não são significativas na obstrução de gotejadores, já quando a concentração é

maior que $1,25 \text{ g L}^{-1}$ as partículas se depositam no labirinto e a vazão do gotejador varia muito. A possibilidade de obstrução aumenta muito quando a concentração passa de $1,25 \text{ g L}^{-1}$ para $1,5 \text{ g L}^{-1}$. 3) As partículas finas que ocasionam a maior sensibilidade à obstrução são as com faixa granulométrica de $0,038\text{--}0,034 \text{ mm}$ e $0,034\text{--}0,031 \text{ mm}$. Uma limitação do estudo foi o curto tempo de exposição em cada faixa granulométrica.

O Institut National de Recherche en Sciences et Technologies pour L'Environnement et L'Agriculture - IRSTEA da França adota o seguinte procedimento para ensaios de obstrução: tempo total de ensaio de 20 dias; funcionamento de oito horas por dia. A cada 40 horas de ensaio são adicionados 125 mg L^{-1} de uma mistura de partículas de argila, silte e areia com os seguintes diâmetros médios: a) 0 – 40 horas: partículas de 0 a $80 \text{ }\mu\text{m}$; b) 40 – 80 horas: partículas de 80 a $100 \text{ }\mu\text{m}$; c) 80 – 120 horas: partículas de 100 a $200 \text{ }\mu\text{m}$; d) 120 – 160 horas: partículas de 200 a $500 \text{ }\mu\text{m}$. Na etapa final do ensaio a concentração de partículas em suspensão é de 500 mg L^{-1} . Esse procedimento de ensaios vem sendo utilizado há aproximadamente 40 anos pelo laboratório Francês e está sendo discutido pelo comitê ISO/TC 23/SC 18 para servir como base para uma proposta de norma ISO. Embora o procedimento de ensaios seja considerado capaz de reproduzir condições de campo, questões associadas a índices de repetitividade e reprodutibilidade de resultados de ensaio ainda requerem estudos para validação do método de ensaios.

2.5 Bancada automatizada para monitoramento de vazão em ensaios de obstrução

Na maioria das pesquisas, a determinação da vazão de gotejadores é realizada manualmente coletando-se volumes e pesando-os em balança de precisão, ou observando o volume em leituras de provetas graduadas. Embora pouco utilizadas em pesquisas relacionadas à obstrução, por exemplo, no trabalho de Niu, Liu e Chen (2012), bancadas automatizadas possibilitam realizar grande número de avaliações de obstrução de gotejadores em ensaios de longa duração com diferentes qualidades de água de irrigação. A automatização do monitoramento de vazão, que apesar de ter como fator potencialmente limitante o custo de implantação, permite redução da mão de obra requerida para condução de ensaios e permite o monitoramento contínuo e individual da variação de vazão de gotejadores. Além disso, desde que o sistema seja devidamente validado, a automatização assegura maior confiabilidade nos resultados, pois rotinas longas e frequentes de medição de vazão são muito suscetíveis a erros de operador quando realizadas manualmente.

2.6 Transporte e deposição de sedimentos em linhas laterais

Shannon et al. (1982) observaram em linhas laterais com 122 m de comprimento e gotejadores do tipo vortex, que sedimentos em suspensão com diâmetro médio das partículas (d_{50}) de 15 μm e concentração média de 50 mg L^{-1} não se acumularam nos 61 metros iniciais; porém, entre 61 e 73 metros e sob velocidade média de escoamento de 0,38 m s^{-1} , formou-se uma linha fina de sedimentos. No trecho de 73 a 98 metros, com velocidade média de 0,3 m s^{-1} , observou a formação de dunas baixas com comprimento de 3 a 8 cm, afastadas de 30 a 60 cm. Essas dunas aumentaram de espessura no trecho de 98 a 110 m e diminuíram no trecho de 110 a 122 m. Observou-se também um decréscimo linear no tamanho das partículas acumuladas após 61 m do início do tubo e que, no local da inserção dos gotejadores, o acúmulo de partículas é menor devido à turbulência.

Partículas maiores se depositam nas partes iniciais do tubo, enquanto partículas menores se depositam nas partes finais da linha lateral, devido a velocidade de escoamento da água necessária para manter as partículas em suspensão. A velocidade de escoamento da água abaixo da qual ocorre a deposição de partículas pode ser estimada pela eq. (6) (Durand; Condolios, 1952; Puig-Bargués; Lamm, 2013).

$$V_D = F_L \sqrt{2gD \left(\frac{\rho_s - \rho_L}{\rho_L} \right)} \quad (6)$$

em que,

F_L - fator de Durand, adimensional;

V_D - velocidade de escoamento da água abaixo do qual ocorre deposição de partículas, m s^{-1} ;

g - aceleração da gravidade, m s^{-2} ;

D - diâmetro interno do tubo, m;

ρ_s - peso específico da partícula, Kgf m^{-3} ; e,

ρ_L - peso específico do líquido, Kgf m^{-3} .

O fator F_L é estimado pela eq. (7) (Puig-Bargués; Lamm, 2013).

$$F_L = 1,3 C_v^{0,125} (1 - e^{-6,9d_{50}}) \quad (7)$$

em que,

C_v - concentração de partículas, em base de volume; e,

d_{50} - diâmetro médio das partículas, em mm.

Na Tabela 1, são apresentados os resultados do cálculo da velocidade de escoamento da água abaixo do qual ocorre deposição de partículas, considerando peso específico das partículas de 2650 kgf m^{-3} e concentração de sólidos em base de volume de 2%. Os diâmetros internos de tubos considerados no cálculo são usuais em sistemas de microirrigação.

Tabela 1 - Velocidade de escoamento da água no tubo, abaixo da qual ocorre deposição de partículas

D (mm)	Diâmetro médio das partículas do sedimento (d_{50} , μm)					
	25	50	75	100	125	150
V_D , m s^{-1}						
15,9	0,09	0,17	0,23	0,29	0,33	0,37
22,2	0,11	0,20	0,27	0,34	0,39	0,44
25,4	0,12	0,21	0,29	0,36	0,42	0,47
34,9	0,13	0,25	0,34	0,42	0,49	0,55

Fonte: Adaptado de Puig-Bargués e Lamm (2013).

2.7 Efeito do “flushing”

Para limpeza de sedimentos em sistemas de microirrigação a norma ASAE EP 405.1 da AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS - ASAE (2003) recomenda uma velocidade mínima de escoamento da água de $0,3 \text{ m s}^{-1}$. Puig-Bargués e Lamm (2013) avaliaram velocidades e durações de “flushing” em tubo de PVC translúcido com 25 mm de diâmetro e concluíram que a velocidade de “flushing” de $0,46 \text{ m s}^{-1}$ com duração de 15 minutos remove 99% dos sedimentos de sílica com concentração de sólidos em base de volume de 2% e diâmetro médio menor que $250 \mu\text{m}$ ou entre 250 e $500 \mu\text{m}$. Já para a velocidade de “flushing” de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ seriam necessários 180 minutos de duração. Os autores ressaltam que em condições de campo, seria mais realista considerar partículas menores que $75 \mu\text{m}$ com concentração de sólidos em base de volume menor que 2%, neste caso velocidades de “flushing” de $0,3 \text{ m s}^{-1}$ podem ser suficientes.

2.8 Efeito da linha de derivação na distribuição das partículas em suspensão nas linhas laterais de gotejamento

Distribuição de vazões em linhas de derivação são muito importantes em diversas áreas da ciência e tecnologia, incluindo: células de combustíveis, aspersores, aquecimento solar de água, microcanais, infiltrações em poros e irrigação (WANG, 2011). Dois modelos de linha de derivação são apresentados na Figura 1.

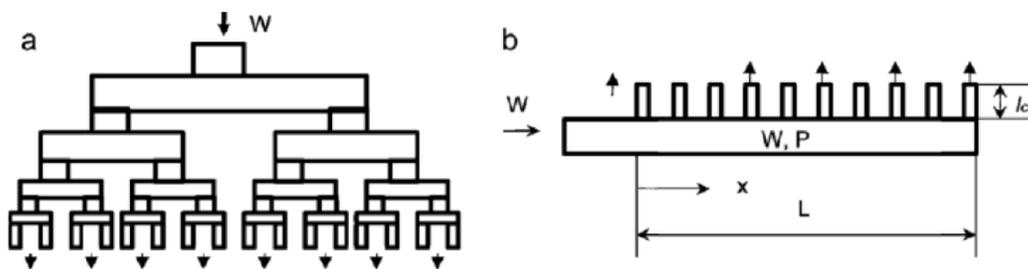


Figura 1 - Esquemas de linha de derivação: a) com bifurcações e b) consecutivo. Fonte: Adaptado de Wang (2011)

Faria (2013) observou que a distribuição do fluxo de água por meio de linha de derivação do tipo consecutivo propicia deslocamento seletivo de partículas sólidas, o que requer o posicionamento estratégico de modelos de tubo gotejador na linha de derivação, possibilitando a análise estatística da influência da posição do tubo gotejador na obstrução devido às partículas sólidas.

Outra opção é utilizar linhas de derivação de menor porte, com bifurcações simétricas, que favorecem a distribuição uniforme da água e não apresentam problemas de tendências de obstrução causadas por caminhos preferenciais na distribuição de partículas.

2.9 Tratamento de água para ensaios de obstrução por partículas de areia

Em ensaios de obstrução realizados com partículas de areia é esperada obstrução ocasionada somente pelas partículas adicionadas na água. Sem os devidos cuidados, a água utilizada nos ensaios pode conter impurezas e contaminantes indesejáveis e capazes de obstruir gotejadores.

O UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE - USDA (2013) recomenda os seguintes tratamentos para precipitados, algas e biofilme nas águas utilizadas em microirrigação: manter o pH da água entre 5,5 e 7,0; injeção contínua de cloro com concentração entre 0,5 e 1 ppm, ou 20 ppm durante 20 minutos em cada ciclo de irrigação; para bactérias ferruginosas usar 1 ppm de cloro a mais do que a concentração de ferro presente, em ppm.

Segundo Richter (2009), a cloração tem como objetivo principal a desinfecção, entretanto o forte poder oxidante do cloro torna-o útil para outras finalidades, entre elas a remoção de sulfetos, ferro e manganês. Os compostos resultantes da oxidação são insolúveis e podem ser removidos por filtração. A quantidade de cloro necessária e seu efeito na alcalinidade da água são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Quantidade de cloro para reação e efeito na alcalinidade

Reagente inorgânico	Quantidade de cloro por quantidade de reagente	Redução na alcalinidade por quantidade de cloro
Ferro	0,64	0,9
Manganês	1,3	1,5
Nitrito	1,5	1,8
Sulfeto para sulfúrico	2,1	2,6

Fonte: Richter (2009).

O cloro é geralmente fornecido na forma de gás (Cl_2), dissolvido em hidróxido de sódio ou hipoclorito de sódio (NaOCl), ou sólido na forma de hipoclorito de cálcio [$\text{Ca}(\text{OCl}_2)$] (NALCO, 2009). Quando o gás cloro é dissolvido na água produz ácido hipocloroso (HOCl) e ácido clorídrico (HCl). Ácido hipocloroso dissocia na água para produzir íon hipoclorito (OCl^-) e íon hidrogênio (H^+). Hipoclorito de sódio ou cálcio, produzem HOCl quando diluídos em água. Tanto HOCl quanto o OCl^- são agentes desinfetantes, porém o HOCl é biocida mais potente. O pH do sistema afeta a quantidade de HOCl e sua ação desinfetante. Acréscimos no pH provocam decréscimo na porcentagem de ácido hipocloroso, conforme Figura 2.

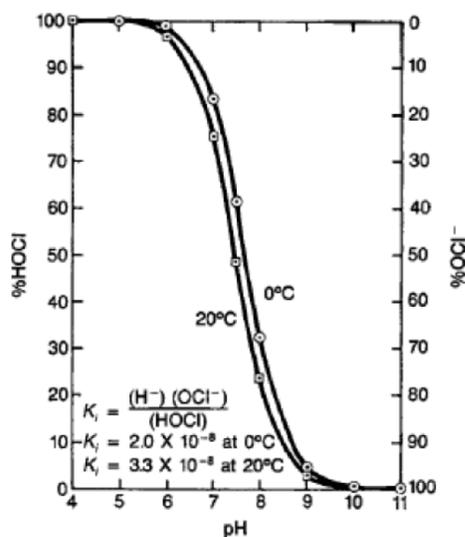


Figura 2 - Dissociação do ácido hipocloroso versus pH. Fonte: The Nalco Water Handbook (2009)

A aplicação de cloro em linhas laterais de gotejamento deve ser realizada com cuidado, de acordo com Teixeira et al. (2014) o tratamento da água com 100 mg L^{-1} de cloro livre em condição dinâmica provoca o decréscimo de 10 a 20 % em média na vazão para alguns modelos de gotejadores mais sensíveis.

Segundo a ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS PARA A ALIMENTAÇÃO E A AGRICULTURA – FAO 29 (1994) a tendência de ocorrer precipitação de cálcio da água pode ser prevista, embora não haja método prático comprovado para avaliar a gravidade do

problema, uma vez que depende de muitos fatores. Uma aproximação da precipitação de cálcio pode ser feita utilizando o índice de saturação de Langelier (ISL) que diz simplesmente que, ao atingir o ponto de saturação de cálcio na presença de bicarbonato, o carbonato de cálcio (CaCO_3) precipita da solução. O índice de saturação é definido como o pH atual da água (pHa) menos o pH teórico (pHc) que a água pode ter equilíbrio com o CaCO_3 . O ISL pode ser calculado, conforme eq. (8).

$$\text{ISL} = \text{pHa} - \text{pHc} \quad (8)$$

Segundo Richter (2009) o ISL pode ser nulo, negativo ou positivo. Se positivo, a água encontra-se supersaturada de carbonato e será incrustante; se negativo, a água será agressiva, enquanto que em valores de $\text{ISL}=0$, verifica-se o equilíbrio de carbonato na solução. O valor de pHa é obtido em laboratório, enquanto o pHc é estimado com a eq. (9).

$$\text{pHc} = (\text{pK}_2 - \text{pK}_c) + \text{pCa} + \text{p(Alk)} \quad (9)$$

em que,

$\text{pK}_2 - \text{pK}_c$ - obtido do somatório das concentrações de Ca, Mg e Na, em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$;

pCa - obtido da concentração de Ca, em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$;

p(Alk) - obtido do somatório das concentrações de CO_3 e HCO_3 , em $\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$.

Para calcular o pHc, são utilizados os valores de referência da Tabela 3. Entrando com o valor do somatório da concentração de (Ca + Mg + Na) na primeira coluna, obtêm-se o valor de $(\text{pK}_2 - \text{pK}_c)$ na coluna dois; entrando com o valor de concentração de Ca na primeira coluna, obtêm-se o valor de pCa na coluna três; e entrando com o valor de concentração de ($\text{CO}_3 + \text{HCO}_3$) na primeira coluna, obtêm-se o valor de p(Alk) na coluna quatro.

Tabela 3 - Valores de referência para cálculo do pHc

Concentração ($\text{mmol}_c \text{L}^{-1}$)	$\text{pK}_2 - \text{pK}_c$	pCa	p(Alk)
0,05	2,0	4,6	4,3
0,10	2,0	4,3	4,0
0,15	2,0	4,1	3,8
0,20	2,0	4,0	3,7
0,25	2,0	3,9	3,6
0,30	2,0	3,8	3,5
0,40	2,0	3,7	3,4
0,50	2,1	3,6	3,3
0,75	2,1	3,4	3,1
1,00	2,1	3,3	3,0
1,25	2,1	3,2	2,9
1,50	2,1	3,1	2,8
2,00	2,2	3,0	2,7
2,50	2,2	2,9	2,6
3,00	2,2	2,8	2,5

4,00	2,2	2,7	2,4
5,00	2,2	2,6	2,3
6,00	2,2	2,5	2,2
8,00	2,3	2,4	2,1
10,00	2,3	2,3	2,0
12,50	2,3	2,2	1,9
15,00	2,3	2,1	1,8
20,00	2,4	2,0	1,7
30,00	2,4	1,8	1,5
50,00	2,5	1,6	1,3
80,00	2,5	1,4	1,1

Fonte: Adaptado da FAO 29 (1994).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Generalidades

A pesquisa foi realizada no Laboratório de Irrigação do Departamento de Engenharia de Biosistemas do campus “Luiz de Queiroz” da USP, no município de Piracicaba – SP. O laboratório possui bancada para ensaios de obstrução de gotejadores constituída por quatro módulos individuais. Cada módulo comporta um conjunto de tubos que são alimentados por reservatório e motobomba também individuais. Apenas um desses módulos foi utilizado para realização dos experimentos, no qual se montaram todos os coletores, bem como, o sistema automatizado para monitoramento de vazão.

No presente estudo avaliou-se somente tubos gotejadores modelo NaanTIF®, que apresentam as seguintes características: emissor do tipo cilíndrico, não regulado e com vazão nominal de 2 L h⁻¹; tubo com diâmetro nominal de 16 mm, diâmetro interno de 14 mm e espessura de parede de 0,9 mm; gotejadores espaçados em 1 m; operação sob pressões de 98,1 a 343 kPa. Na Figura 3A pode ser observado que a entrada de vazão no gotejador ocorre em praticamente toda a circunferência interna, após a água passa pelo pré-filtro (indicado pelo retângulo vermelho na Figura 3B) e em seguida percorre a labirinto até sair na forma de gotas por dois orifícios.

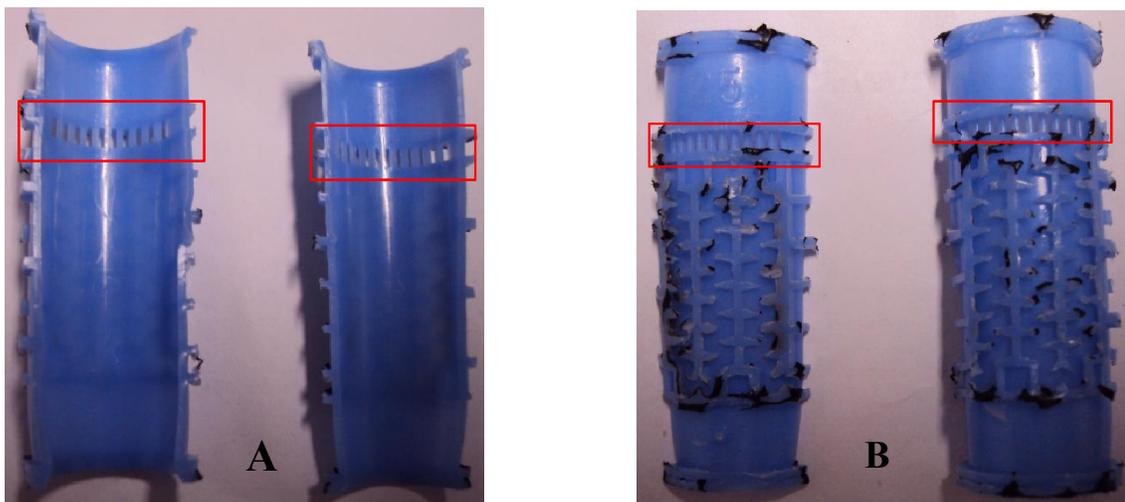


Figura 3 - Retângulos vermelhos indicam: A) Entrada de água no labirinto do gotejador; B) Pré-filtro antes do labirinto do gotejador

Foi selecionado o modelo de gotejador não regulado, pois não tem membrana interna, que sob efeito de obstrução pode ocasionar aumento ou diminuição de vazão do gotejador, tornando a análise dos resultados dos ensaios de obstrução complexa.

3.2 Projeto hidráulico da bancada

Na fase de projeto hidráulico da bancada foi definido que o sistema precisaria atender às seguintes especificações: a) ter comprimento e largura máximos que não ultrapassassem as dimensões da bancada já existente; b) ser possível simular diferentes velocidades de escoamento da água nas linhas laterais; c) vazão uniforme entre as linhas laterais, a fim de evitar caminhos preferencias para o deslocamento de partículas; d) ser possível monitorar a vazão de, no mínimo, 25 gotejadores continuamente.

A largura da bancada permitiu a instalação de linha de derivação do tipo com bifurcações simétricas, contendo 8 linhas laterais equidistantes, espaçadas em 0,18 metros e com comprimento máximo de 5 metros. O tipo de linha de derivação escolhida assegura distribuição uniforme de vazão entre as oito linhas laterais.

Os coletores construídos para as medições de vazão foram acoplados a quatro suportes com rodízios que se movimentam sobre trilhos e permitem o deslocamento dos coletores. Em cada suporte foram fixados oito coletores, totalizando 32 coletores, um para cada gotejador avaliado (Figura 4). O número de coletores adotado foi maior que o número mínimo de 25 gotejadores avaliados.

Cada linha lateral utilizada na bancada possuía cinco gotejadores que foram instalados sem observar a posição final dos orifícios de descarga. Para controlar a velocidade de escoamento nas linhas laterais, bocais de microaspersor e aspersor foram instalados no final das linhas, conforme metodologia utilizada por Rettore Neto et al. (2014). A pressão no início das laterais foi monitorada com manômetro digital conectado no início da primeira linha lateral (Figura 4).

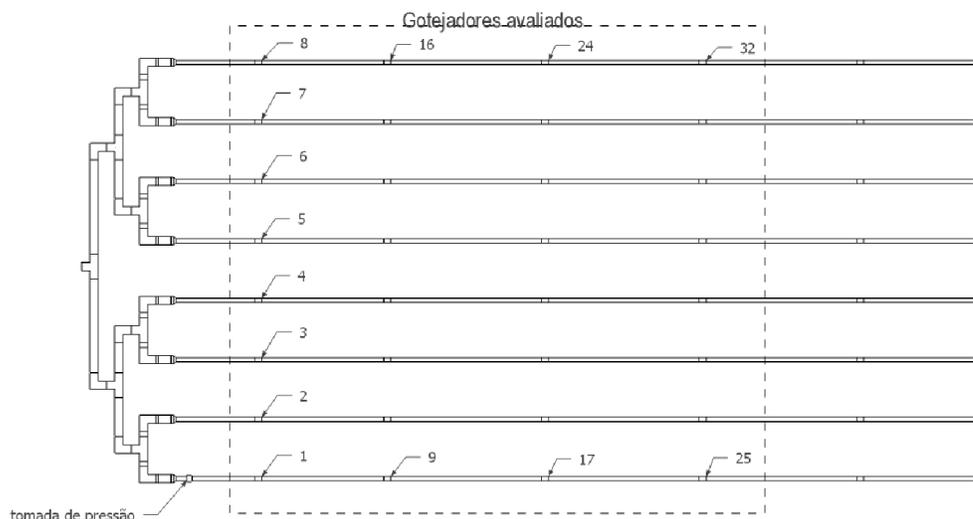


Figura 4 - Gotejadores avaliados nos ensaios de obstrução

Conforme descrito a partir do tópico 3.7, partículas de areia com diâmetro médio de 500 μm (maior diâmetro utilizado nos ensaios) podem sedimentar se a velocidade de escoamento for menor que $0,41 \text{ m s}^{-1}$ (eq. 6), considerando nos cálculos tubo com diâmetro interno de 28 mm (tubulação que conduz água do reservatório até a linha de derivação) e concentração de partículas de areia na água de 500 mg L^{-1} (maior concentração utilizada nos ensaios). Sendo assim, a tubulação que conduz água do reservatório para a derivação foi dimensionada para operar com velocidade de escoamento da água próxima a 1 m s^{-1} , a fim de assegurar que as partículas mantenham-se em suspensão e atinjam a entrada das linhas laterais. Na Figura 5 observa-se o esquema hidráulico da bancada de ensaios de obstrução de gotejadores.

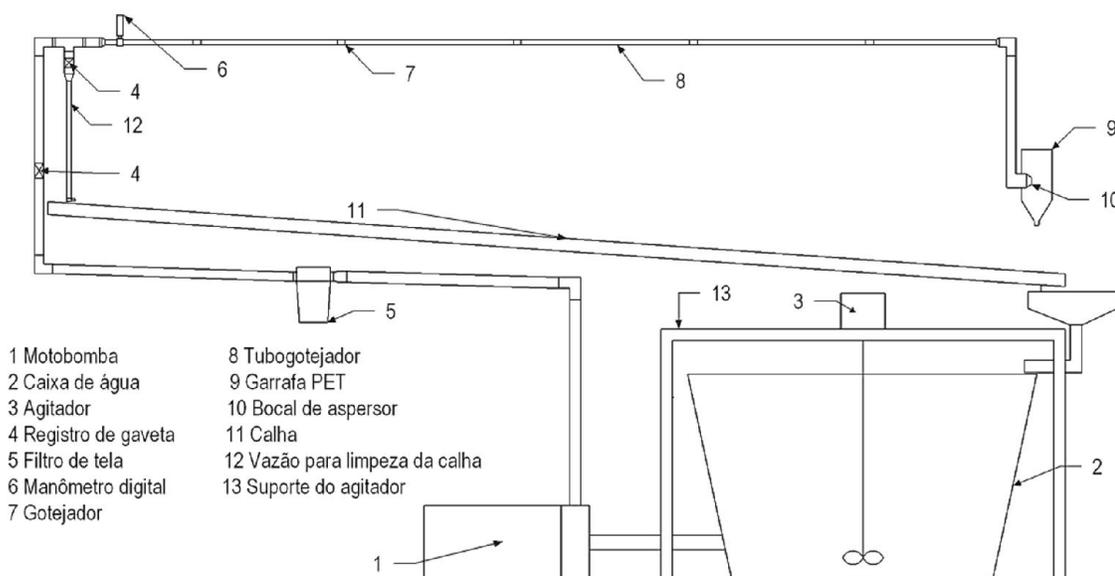


Figura 5 - Esquema hidráulico da bancada de ensaios de obstrução

Utilizou-se um reservatório de polietileno com capacidade para 250 L em conjunto com um agitador mecânico para manutenção da mistura de partículas sólidas em suspensão. O agitador mecânico é dotado de hélices, cuja velocidade de rotação é controlada por inversor de frequência acoplado ao motor elétrico.

Devido ao efeito abrasivo da areia, o corpo e rotor da motobomba podem soltar partículas metálicas capazes de obstruir os gotejadores utilizados nos ensaios. Visando minimizar esse possível problema, foi instalado filtro de tela na linha adutora. Outra opção é utilizar bomba hidráulica com carcaça e rotor emborrachados, porém são bombas caras e de alta vazão, inviabilizando o uso em ensaios de obstrução de gotejadores. O tamanho das aberturas da tela do filtro utilizado precisa ser maior que o diâmetro médio das partículas de areia para evitar sua retenção. Para o menor diâmetro de partículas foi utilizado filtro de

irrigação com elemento filtrante de tela com 160 mesh. Para os outros dois diâmetros de partículas não foram encontrados filtros de irrigação adequados, apesar de constarem nos catálogos dos fabricantes, não estão disponíveis para venda no Brasil. A alternativa encontrada foi o uso de filtro para pulverizador com elementos filtrantes de tela com 30 e 50 mesh, respectivamente, um para cada faixa de diâmetro de partículas.

3.3 Análise estatística da distribuição de vazão na bancada

Para avaliar a influência dos bocais utilizados nos finais das linhas laterais e da linha de derivação com bifurcações simétricas na distribuição de vazão entre as oito linhas laterais, foram comparadas as vazões médias coletadas por análise da variância e comparação de médias.

Realizou-se ensaios de uniformidade de vazão de três diferentes modelos de bocais (Figura 6A): um de microaspersor (vermelho) com diâmetro de 1,5 mm e dois de aspersores com diâmetros de 2 e 3,8 mm (verde e amarelo, respectivamente). Para cada modelo foram avaliados 10 bocais em três repetições, utilizando-se as bancadas de ensaio de microaspersores (Figura 6B) e de bocais de aspersores (Figura 6C).

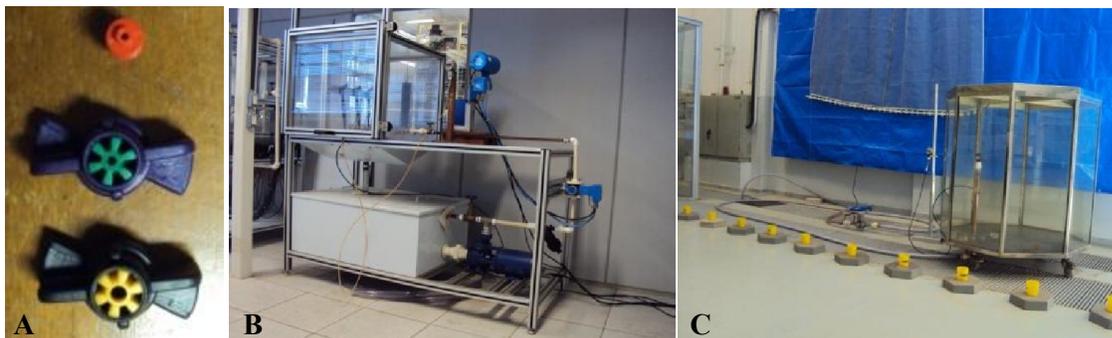


Figura 6 - A) Modelos de bocais avaliados; B) Bancada de ensaio de microaspersor; C) Bancada de ensaio de bocais de aspersor

Foram realizadas medições de vazão com medidor eletromagnético, enquanto a pressão foi mantida constante em 98,1 kPa e observada em manômetro digital.

Dos 10 bocais ensaiados, 8 bocais foram selecionados para uso no final das 8 linhas laterais (Figura 7A). Os bocais foram conectados no final das linhas laterais de tubos de polietileno sem gotejadores, com diâmetro interno de 14 mm. A vazão de cada lateral foi obtida por meio da massa de água coletada num determinado tempo, utilizando balança de precisão. Para facilitar a coleta da água, no final das linhas laterais foram instalados tubos de PVC branco roscáveis para aproximar os bocais de aspersor do nível da calha da bancada, conforme Figura 7B. Já os bocais de microaspersor foram conectados em micro tubos e estes conectados nas

linhas laterais, todos os 8 bocais foram presos em tubo de PVC marrom (Figura 7C), para facilitar a coleta simultânea de vazão.

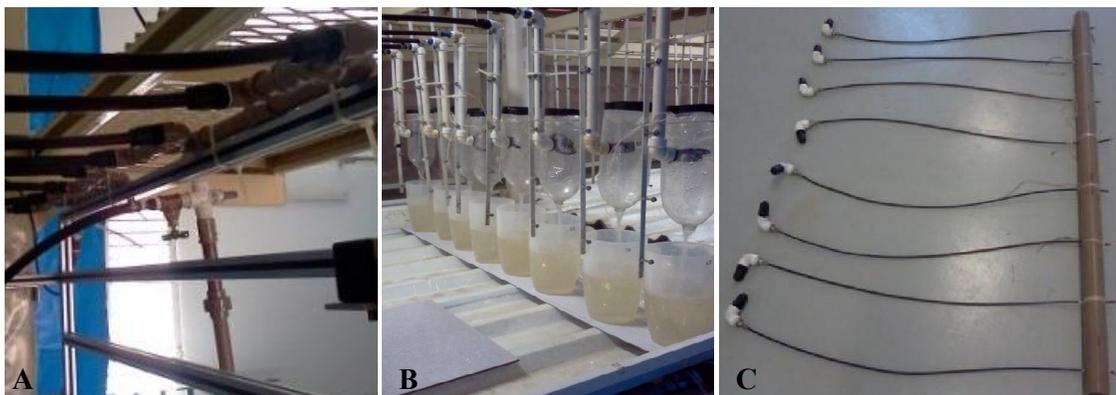


Figura 7 - A) Linha de derivação com bifurcações simétricas com 8 linhas laterais; B) Ensaio de divisão de vazão nas linhas laterais conectadas na linha de derivação; C) Conexão dos bocais de microaspersor no final das linhas laterais

3.3.1 Pressupostos da análise de variância e comparação de médias

Um conjunto de testes estatísticos foi realizado com o objetivo de comprovar que não há diferenças significativas entre as vazões das linhas laterais. Uma vez que a distribuição de vazões seja uniforme, entende-se que não há deslocamento preferencial de partículas e, portanto, não há tendências provocadas pelo design da linha de derivação ou posicionamento das linhas laterais.

O pressuposto de independência dos resíduos foi atendido para os ensaios dos bocais e de uniformidade de distribuição de vazão na linha de derivação. Os bocais foram ensaiados individualmente, a vazão de um bocal não tem influência na vazão dos outros. Na linha de derivação todas as linhas laterais recebem mesma vazão, já que foi construído no formato de bifurcações simétricas.

Resíduos são considerados normais, quando o valor P do teste de Shapiro-Wilk é maior que 0,05. Caso o teste de normalidade dos resíduos apresente valores P menores que 0,05 os dados são transformados com a família de transformações Box-Cox e verifica-se o valor P do teste de Shapiro-Wilk, caso continuem não normais a análise da variância é realizada pelo método não paramétrico de Kruskal-Wallis.

O pressuposto de homogeneidade de variâncias é verificado pelo teste de Bartlett para resíduos normais e pelo teste de Levene para resíduos não normais, variâncias de vazões são consideradas homogêneas quando o valor P é maior que 0,05. Para comparar vazões médias entre bocais ou linhas laterais, utilizou-se o teste de comparações múltiplas entre pares de

médias de Kruskal-Wallis para bocais ou linhas laterais com distribuição de vazões não normais e o teste de Tukey para bocais ou linhas laterais com distribuição de vazões normal.

3.4 Automação da bancada de ensaios

Para avaliar continuamente as variações de vazão dos gotejadores, desenvolveu-se um sistema automatizado para monitoramento de vazão. O software, hardware e os coletores para monitoramento da vazão dos gotejadores foram desenvolvidos pela equipe do INCT-EI.

Na bancada automatizada (Figura 8A), a vazão dos 32 gotejadores é monitorada por coletores automatizados (Figura 8B) equipados com transdutor de pressão Motorola/Freescale-MPX5010DP para leitura do nível da água e válvula solenoide do tipo pinça para drenagem do volume coletado. Uma outra opção para medição de vazão seria o uso de coletores equipados com células de carga, entretanto esses transdutores de força apresentam custo mais elevado que os transdutores de pressão utilizados na pesquisa e são bastante sensíveis a vibrações e correntes de ar. Devido a essas limitações e as condições do laboratório, optou-se pela determinação de vazão com base em variação de nível utilizando transdutores de pressão. Além disso, utilizou-se válvulas solenoides do tipo pinça, pois válvulas solenoides convencionais apresentariam problemas de vedação devido a presença de partículas de areia na água. O dispositivo atuador das válvulas do tipo pinça controla a passagem de água através de um tubo de silicone e, portanto não existe contato entre a mistura contendo partículas de areia e o atuador da válvula, consequentemente a vedação é perfeita.

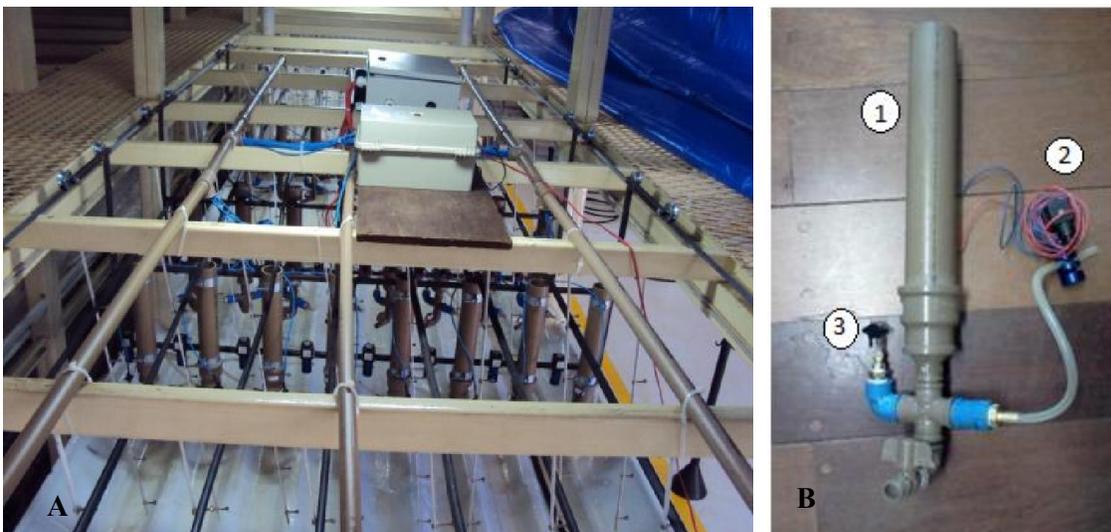


Figura 8 - A) Bancada automatizada para ensaios de obstrução. B) Coletor (1) equipado com válvula solenoide do tipo pinça (2) e transdutor de pressão (3)

A rotina de monitoramento de vazão consiste em: (1) drenar todos os coletores até um nível mínimo; (2) registrar o nível e horário iniciais; (3) aguardar tempo de coleta definido pelo usuário; (4) registrar o nível e hora finais e calcular a vazão correspondente; (5) repetir o ciclo. A água drenada dos coletores é descarregada sobre uma calha que conduz a mistura de volta para o reservatório. A saída de água dos tubos de silicone foi posicionada 5 cm acima dos transdutores, para garantir um nível mínimo após a drenagem dos coletores.

Os principais componentes dos sistemas para aquisição de dados (Figura 9A) e controle de válvulas (Figura 9B) são microcontroladores PIC. O sistema funciona como uma aplicação mestre/escravo, em que o computador coordena as tarefas executadas pelos módulos, através da transmissão de mensagens por uma rede RS-485. O protocolo de comunicação é baseado em mensagens ASCII e foi projetado especificamente para aplicações do INCT-EI. O sistema microprocessado não foi concebido para ser integrado com dispositivos comerciais, embora isso pudesse ser feito.



Figura 9 - A) Módulo microprocessado para aquisição de dados; B) Módulo microprocessado para controle de válvulas

Na interface de controle (Figura 10) do programa supervisor, desenvolvido em linguagem Pascal, é possível observar o nível da água em cada coletor e a vazão da leitura anterior (números em verde). Esses indicadores são úteis para visualizar a obstrução de gotejadores e possíveis problemas nos transdutores de pressão. Na terceira aba do programa são inseridos os coeficientes obtidos durante a calibração dos transdutores de pressão. Adicionalmente, o aplicativo dispõe de registro de eventos de comunicação entre o computador e o sistema microprocessado, permitindo identificar alguma falha de execução.

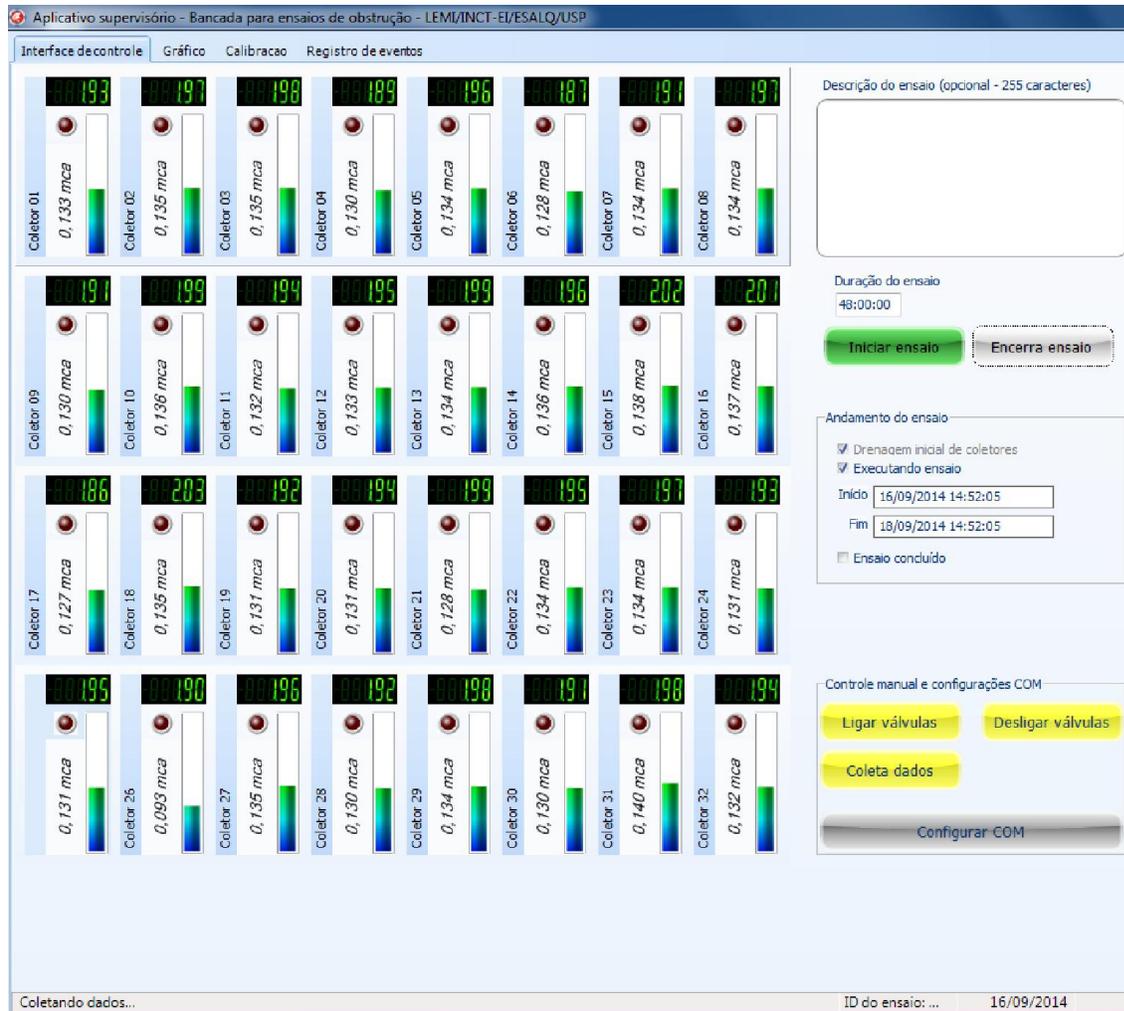


Figura 10 - Aplicativo supervisorio

3.4.1 Ajuste de equações dos transdutores de pressão

Para ajustar as equações utilizaram-se cinco pontos de leitura ao longo da faixa de medição dos transdutores. O primeiro deles foi o de nível de água zero nos coletores, ou seja, após a drenagem dos mesmos. Os outros quatro pontos foram obtidos adicionando-se aproximadamente 150 g de água, medida em balança de precisão. A massa de água foi convertida em nível da água no coletor, por meio da massa específica da água e pela área do coletor. Para cada nível de água no coletor foi obtido um número digital no software, usado para fazer o ajuste de uma equação linear, cujos coeficientes de ajuste, posteriormente, foram inseridos no software.

3.5 Análise de incerteza do sistema de medição de vazão

A vazão estimada dos coletores automatizados é calculada com a eq. (10).

$$q = \frac{0,0009\pi D^2 h}{t} \quad (10)$$

em que,

q - vazão, L h⁻¹;

D - diâmetro do tubo coletor, mm;

h - altura de água no tubo de coleta, mm; e,

t - intervalo de tempo entre dois registros de dados, s.

Os valores médios esperados das variáveis ao longo dos ensaios são:

Vazão máxima (variável): 2 L h⁻¹

Diâmetro fixo: 51,16 mm

Altura máxima: 300 mm

Intervalo de tempo: mínimo de 60 s.

Derivando parcialmente a eq. (10) são obtidos os coeficientes de sensibilidade, apresentados na Tabela 4.

Tabela 4 - Coeficiente de sensibilidade

De vazão em relação ao diâmetro	$c_D = \frac{\partial q}{\partial D} = \frac{0,0018\pi D h}{t}$
De vazão em relação à altura de água nos coletores	$c_h = \frac{\partial q}{\partial h} = \frac{0,0009\pi D^2}{t}$
De vazão em relação ao intervalo de tempo de registro de dados	$c_t = \frac{\partial q}{\partial t} = -\frac{0,0009\pi D^2 h}{t^2}$

Na tabela 5 são apresentados os resultados dos cálculos das incertezas padrão combinada do diâmetro dos coletores, do transdutor de pressão e do tempo de registro de dados do computador.

Tabela 5 - Incerteza padrão combinada

Fonte de incerteza	Dist. Prob.	u	Div.	c	Contribuição para u	g. l.
No diâmetro dos coletores						
Repetitividade (n = 10)	Normal	0,15	1	1	0,15	9
Resolução (mm)	Retangular	0,01	$2\sqrt{3}$	1	0,00289	∞
Incerteza de calibração do paquímetro (mm)	Retangular	0,10	2	1	0,050	∞
Incerteza padrão combinada - $u_c(D)$, em mm.	t-Student	--	2,02	--	0,069	40
No nível de água nos coletores						
Calibração do transdutor de pressão	Retangular	1,00	2	1	0,50	∞
Repetição das indicações (n = 50)	Normal	1,43	\sqrt{n}	1	0,20	49
Resolução	Retangular	0,24	$2\sqrt{3}$	1	0,070	∞
Histerese	Retangular	0,50	$2\sqrt{3}$	1	0,14	∞
Incerteza padrão combinada - $u_c(h)$, em mm.	t-Student	--	1,96	--	0,56	∞
No tempo de registro de dados						
Calibração do cronômetro	Retangular	0,035	2	1	0,035	∞
Resolução	Triangular	0,10	$\sqrt{6}$	1	0,029	∞
Incerteza padrão combinada - $u_c(t)$, em s.	t-Student	--	1,96	--	0,045	∞

Dist. Prob. - distribuição de probabilidade; u - incerteza padrão; Div. - divisor; c - coeficiente de sensibilidade; g. l. - graus de liberdade.

Para o cálculo da incerteza-padrão na estimativa de vazão dos coletores, utiliza-se a fórmula geral para propagação das incertezas individuais, conforme eq. (11).

$$u_q = \sqrt{[c_D u_c(D)]^2 + [c_h u_c(h)]^2 + [c_t u_c(t)]^2} \quad (11)$$

Substituindo os coeficientes da Tabela 4 na eq. (11), obtém a fórmula específica, conforme eq. (14).

$$u_q = \sqrt{\left(\frac{0,0018\pi Dh}{t} u_D\right)^2 + \left(\frac{0,0009\pi D^2}{t} u_h\right)^2 + \left(-\frac{0,0009\pi D^2 h}{t^2} u_t\right)^2} \quad (12)$$

Com o resultado do cálculo de incerteza foi determinado o tempo mínimo de coleta de vazão pelos coletores automatizados.

3.6 Avaliação da bancada automatizada para ensaios de obstrução de gotejadores

A bancada automatizada para ensaios de obstrução de gotejadores foi avaliada, com objetivo de verificar possíveis erros na medição da vazão dos gotejadores. Por meio de análise

gráfica foi observada a variabilidade associada a cada um dos 32 coletores automatizados, utilizados para estimar a vazão dos gotejadores com água limpa.

Para avaliar a variabilidade e desvio das indicações de vazão realizaram-se leituras de vazão a cada 12 minutos em um período de 48 horas. Comparou-se a vazão medida pelo sistema automático com aquela estimada por pesagem da massa de água coletada em um determinado tempo, em três repetições. A estimativa de vazão por meio da medição de massa foi considerada como o padrão, conforme detalhes abordados pela norma ABNT NBR ISO 9261 (2006). Toda a análise dos dados foi realizada no ambiente de programação R.

3.7 Avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução causada por partículas sólidas inertes

O material utilizado nos experimentos com partículas sólidas inertes foi a areia utilizada em filtros de piscina, descrita tecnicamente como areia de sílica, livre de carbonatos e matéria orgânica. Foi escolhido um material comercial para que outros laboratórios possam reproduzir mais fielmente as avaliações propostas nessa pesquisa. As partículas de areia foram separadas por tamanho usando agitador e peneiras (Figura 11A), ao final do processo de peneiramento foram obtidas as faixas de diâmetro de partículas (Figura 11B).



Figura 11 - A) Agitador mecânico; B) Areia separada em faixas de diâmetro de partículas

Na Figura 12 pode ser visualizado que mesmo utilizando um material comercial e separado por faixas granulométricas o formato das partículas de areia é bastante irregular e variável, o que pode ocasionar diferentes potenciais de obstrução, alguns formatos passam mais facilmente pelo labirinto dos gotejadores enquanto outros podem depositar mais facilmente.

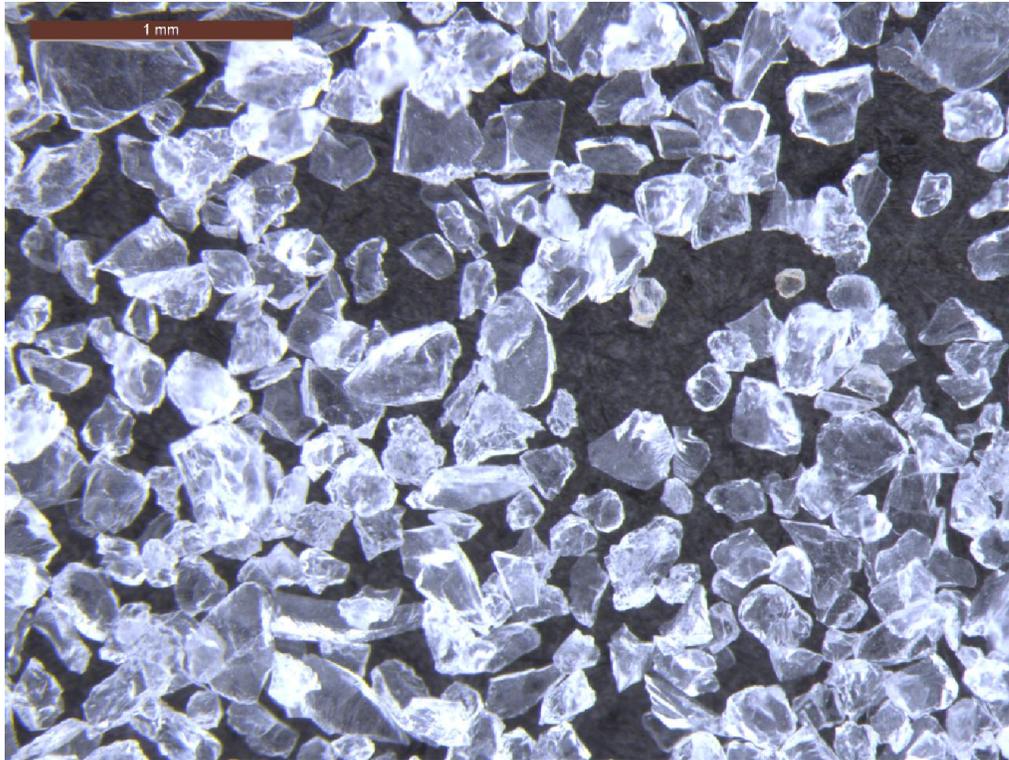


Figura 12 - Formato das partículas de areia

3.8 Critérios para avaliação da sensibilidade de gotejadores a obstrução por partículas sólidas inertes

Dentre os fatores que afetam a obstrução de gotejadores por partículas inertes, destacam-se a concentração de sólidos em suspensão, o tamanho de partículas e a posição em que o emissor se encontra ao longo da linha lateral. Sabe-se que a obstrução é mais comum em gotejadores localizados nos finais de linha, onde as velocidades de escoamento são mais baixas e favorecem a sedimentação de partículas (CAPRA; SCICOLONE, 1998). Sendo assim, os experimentos visam avaliar o efeito da granulometria, concentração de partículas e velocidade de escoamento da água nos tubos gotejadores. O ajuste da velocidade de escoamento nas linhas laterais é um modo de simular o potencial ou risco de obstrução de gotejadores localizados no início de linhas, onde as velocidades de escoamento são mais elevadas, e no final de linhas, onde as velocidades são menores e a sedimentação de partículas é favorecida.

As faixas granulométricas avaliadas estão entre 53 μm (areia fina, peneira ASTM 270) e 500 μm (peneira ASTM 35), sendo que o valor maior corresponde a uma condição extrema equivalente a um sistema de irrigação praticamente sem sistema de filtragem (malha de 32 mesh). As concentrações de partículas adotadas são superiores a 100 mg L^{-1} , pois essa é uma

condição considerada de alto risco de obstrução (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979); e, não devem ultrapassar 500 mg L^{-1} para que os ensaios em laboratório reproduzam condições de campo. As velocidades de escoamento nos tubo-gotejadores deverão representar uma linha lateral em condições de campo, ou seja, na faixa de 0 a 1 m s^{-1} . Para uma dada combinação de fatores, o tempo de exposição dos gotejadores a condição de risco de obstrução é uma variável de difícil determinação, para o qual ainda não há recomendações ou critérios prévios que possibilitem sua definição precisa. O protocolo de ensaios de obstrução adotado pelo laboratório francês LERMI/IRSTEA descreve 40 h de exposição. No caso dessa pesquisa, cada nível ou tratamento terá duração de 48 horas ininterruptas para facilitar as rotinas de ensaio. Partículas sólidas inertes não estão sujeitas a fenômenos de agregação ou dispersão nem durante o escoamento e nem quando o sistema de bombeamento estiver desligado, e por este motivo, os ensaios serão realizados 24 horas por dia, efetuando-se interrupções apenas para substituição da mistura e de amostras de tubo-gotejadores.

A vazão de 32 gotejadores foi monitorada e serve como variável para avaliar a sensibilidade de gotejadores a obstrução em cada um dos tratamentos a serem avaliados.

3.9 Experimentos para avaliação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas inertes

O modelo de tubo-gotejador avaliado, inicialmente foi submetido ao ensaio para determinação do coeficiente de variação de vazão devido a efeitos de fabricação (CV_f), utilizando água destilada. A vazão inicial de 32 gotejadores foi registrada visando permitir a análise da evolução de obstrução em cada gotejador ao final dos experimentos.

A proposta de ensaios para avaliação da sensibilidade de gotejadores a obstrução causada por partículas inertes, resulta da combinação dos fatores listados abaixo:

- Concentração de partículas em suspensão: $C1=100 \text{ mg L}^{-1}$; $C2=250 \text{ mg L}^{-1}$; $C3=500 \text{ mg L}^{-1}$;
- Faixas granulométricas: $G1=53$ a $105 \text{ }\mu\text{m}$; $G2=105-250 \text{ }\mu\text{m}$; $G3=250-500 \text{ }\mu\text{m}$;
- Velocidades de escoamento da água na entrada das linhas laterais: $V1= 0,13 \text{ m s}^{-1}$; $V2= 0,25 \text{ m s}^{-1}$; $V3= 0,94 \text{ m s}^{-1}$.

A fim de permitir uma análise detalhada e individual sobre como cada fator contribui para o processo de obstrução de gotejadores, a cada ensaio foi variado apenas um dos fatores sendo que os outros dois permaneceram constantes.

O tempo de ensaio para cada combinação de três fatores foi de 48 horas . O cronograma de ensaios para as combinações dos fatores está descrito na Tabela 6.

Tabela 6 - Cronograma de ensaios

Etapa	Intervalo de tempo dos ensaios (h)		
	0-48	48-96	96-144
1	V1-G1-C1	V1-G1-C2	V1-G1-C3
2	V1-G2-C1	V1-G2-C2	V1-G2-C3
3	V1-G3-C1	V1-G3-C2	V1-G3-C3
4	V2-G1-C1	V2-G1-C2	V2-G1-C3
5	V2-G2-C1	V2-G2-C2	V2-G2-C3
6	V2-G3-C1	V2-G3-C2	V2-G3-C3
7	V3-G1-C1	V3-G1-C2	V3-G1-C3
8	V3-G2-C1	V3-G2-C2	V3-G2-C3
9	V3-G3-C1	V3-G3-C2	V3-G3-C3

Em que: V é a velocidade de escoamento da água na entrada da linha lateral; G é a granulometria das partículas de areia; C é a concentração de areia na água.

Por exemplo, na Tabela 6, no intervalo de 0-48 horas da etapa 1, V1-G1-C1 representa a combinação da velocidade 1, granulometria 1 e concentração 1, ao final de 48 horas foram adicionados 150 mg L⁻¹ de areia e ao final de 96 horas adicionados 250 mg L⁻¹ de areia, em 144 horas é concluída a etapa. Ao final de cada etapa (144 horas), os tubos foram substituídos por novos, foi realizada limpeza do sistema e a água do reservatório substituída.

Todos os ensaios foram conduzidos sob pressão constante de 98,1 kPa, medida na entrada de uma das linhas laterais.

3.10 Qualidade da água utilizada nos ensaios de obstrução por partículas de areia

A água disponível para ensaios no laboratório é proveniente da estação de tratamento de água da universidade e conduzida até o laboratório por tubulação de ferro fundido antiga que pode liberar óxido de ferro na água. Para contornar esse problema foi realizada a destilação de toda a água utilizada nos ensaios de obstrução de gotejadores, aproximadamente 5000 L, já que ao final de cada etapa (144 horas) de ensaio o sistema era lavado e trocava-se a água. Todos os dias cerca de 50 L de água destilada foram adicionadas ao tanque para repor as perdas por evaporação.

O potencial hidrogeniônico (pH) da água destilada foi monitorado com medidor de bancada, pois o mesmo deveria ser mantido no intervalo de $7 \pm 0,5$. Caso estivesse acima, seria necessária a injeção de ácido para evitar a formação de precipitados provenientes do rotor e carcaça de ferro fundido da bomba e das peças metálicas do sistema. O volume de ácido necessário para abaixamento do pH da água foi obtido com a seguinte metodologia: 1) coletar 10 litros da água utilizada nos ensaios; 2) medir o pH com pHmetro; 3) adicionar pequenas

quantidades de ácido e medir o pH e 4) plotar os pares de pontos pH versus volume de ácido no gráfico. Na Figura 13 é apresentado o gráfico da titulação com ácido clorídrico (HCl).

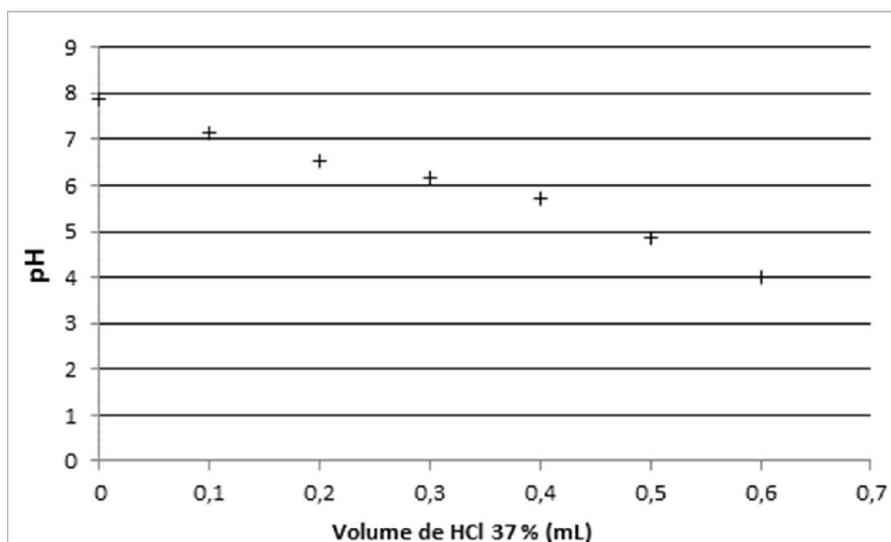


Figura 13 - Volume de HCl 37 % para abaixamento do pH de 10 litros de água destilada

A adição HCl não foi necessária, o pH da água destilada foi monitorado duas vezes por dia, todos os dias dos ensaios e ficou no faixa de 6,9 a 7,1.

Outra preocupação era com a obstrução devido ao desenvolvimento de algas e biofilme, necessitando-se realizar a cloração da água com hipoclorito. A seguir são apresentados os cálculos da dosagem de hipoclorito de sódio (NaOCl) necessária para obter uma concentração 3 mg L⁻¹ de Cl₂ em reservatório de 250 L de água. Sabendo-se que a massa específica da solução de hipoclorito de sódio a 10% é igual a 1138,3 kg m⁻³, calculou-se o equivalente químico de cloro disponível na molécula de NaOCl, conforme eq. (13).

$$\frac{\text{Cl}_2}{\text{NaOCl}} = \frac{71 \text{ g}}{74,5 \text{ g}} = 0,953 \quad (13)$$

No segundo passo determinou-se a concentração de cloro disponível (C_{cd}) na solução de hipoclorito de sódio, conforme eq. (14).

$$C_{cd} = \frac{m_{\text{Cl}_2}}{V_{\text{NaOCl}}} = 0,953 \frac{\rho V_{\text{NaOCl}} C_{\text{NaOCl}}}{V_{\text{NaOCl}}} = 0,953 \rho P = 108,48 \frac{\text{KgCl}_2}{\text{m}^3} \quad (14)$$

em que,

m_{Cl_2} é massa de cloro disponível na solução de hipoclorito de sódio a 10%, kg;

ρ é a massa específica da solução de hipoclorito de sódio, kg m⁻³;

C_{NaOCl} é a concentração de hipoclorito de sódio, kg kg⁻¹;

V_{NaOCl} é o volume da solução de hipoclorito de sódio, m³; e

0,953 é a fração de cloro disponível na molécula de hipoclorito de sódio.

No terceiro passo calculou-se o volume de NaOCl a ser adicionado no tanque, conforme eq. (15).

$$C_{cd} V_{NaOCl} = C_{Cl_2} V_r \quad (15)$$

em que,

C_{Cl_2} é a concentração de cloro, $kg\ m^{-3}$.

Rearranjando-se a eq. (15) e substituindo os valores conhecidos, conforme eq. (16).

$$V_{NaOCl} = \frac{3 \cdot 250}{108,48 \cdot 1000} \quad (16)$$

Obtém-se $V_{NaOCl}=6,9 \times 10^{-3}$ L, ou 6,9 mL.

Em teste inicial foi observado que a injeção de cloro na água oxidava o rotor e carcaça de ferro fundido da motobomba e o hidróxido de ferro formado após a reação precipitava, portanto, a injeção de cloro na água não foi feita. Como recomendação para experimentos futuros deve-se utilizar bomba com rotor e carcaça de inox ou porcelana.

A temperatura da água foi monitorada duas vezes por dia durante os ensaios, às 9h00min e às 16h00min, por meio de um termômetro de vidro e ficou na faixa de 28 a 32 °C. A elevação de temperatura da água ocorre devido ao funcionamento da motobomba e do agitador mecânico, outro fator é variação da temperatura ambiente, já que o laboratório não possui temperatura ambiente controlada.

3.11 Avaliação da obstrução dos gotejadores

Na eq. (5) proposta por Qingsong et al. (2008) o conjunto de 25 gotejadores é considerado obstruído quando a razão entre as vazões durante o ensaio de obstrução e vazão nominal é inferior a 75. Contudo, a vazão nominal é determinada para uma pressão, segundo critérios de projeto do fabricante. Como o gotejador é do tipo não regulado, tornou-se conveniente determinar a vazão inicial para a pressão de 98,1 kPa, que foi aquela utilizada nos ensaios de obstrução. Outra limitação é fixar o número de gotejadores em 25, já que a norma exige no mínimo 25 gotejadores, mas não define número máximo. Para contornar essas limitações preferiu-se adotar a eq. (17), para estimar a obstrução do conjunto de gotejadores.

$$\text{Razão de vazão (\%)} = 100 \left(\frac{\sum_{i=1}^N q_{\text{atual}}}{N q_{\text{inicial}}} \right) \quad (17)$$

em que,

N é o número de gotejadores avaliados, mínimo de 25;

q_{atual} - vazão atual de cada gotejador sendo avaliado, $L h^{-1}$; e,
 q_{inicial} é a vazão média dos N gotejadores determinada com água limpa na mesma pressão utilizada no ensaio de obstrução, $L h^{-1}$.

A razão de vazão estimada pela eq. (17) não é uma medida da variabilidade de vazão entre os N gotejadores avaliados no ensaio de obstrução, para isso será utilizada como medida de dispersão das N vazões em relação à média, o coeficiente de variação de vazão atual [$CVq_{\text{(atual)}}$], expresso pela eq. (18).

$$CVq_{\text{(atual)}} = \frac{S_q}{\bar{q}} \quad (18)$$

em que,

S_q é o desvio padrão das vazões, em $L h^{-1}$; e,

\bar{q} é a vazão média dos N gotejadores durante os ensaios de obstrução.

O $CVq_{\text{(atual)}}$ foi determinado com as vazões dos gotejadores, durante todo o tempo dos ensaios de obstrução, diferente do $CVq_{\text{(inicial)}}$, determinado antes do início de cada ensaio de obstrução, somente com água destilada, na pressão de 98,1 kPa, mesma pressão utilizada nos ensaios de obstrução. O ensaio de obstrução inicia após o término do ensaio de $CVq_{\text{(inicial)}}$, sem que o sistema seja desligado.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise de incerteza do sistema de medição de vazão

O tempo de 12 minutos foi adotado para integrar as leituras de vazão da bancada automatizada no banco de dados, este tempo é necessário para obter incerteza expandida em relação ao fundo de escala de vazão (2 L h^{-1}) menor que 5,5 %, conforme resultados apresentados na quinta coluna da Tabela 7.

Tabela 7 - Incertezas padrão e expandida da estimativa de vazão

Vazão (L h^{-1})	Duração da coleta de água (min)	Nível (mm)	Incerteza padrão (L h^{-1})	Fator de abrangência	Incerteza expandida em relação ao fundo de escala (%)
0,10	5	4,1	0,014	13,97	9,7
0,25		10,1	0,014	13,97	9,7
0,50		20,3	0,014	13,97	9,7
1,00		40,5	0,014	13,97	9,9
1,50		60,8	0,014	13,97	10,1
2,00		81,1	0,015	13,97	10,4
0,10	10	8,1	0,007	13,97	4,9
0,25		20,3	0,007	13,97	4,9
0,50		40,5	0,007	13,97	4,9
1,00		81,1	0,007	13,97	5,2
1,50		121,6	0,008	13,97	5,6
2,00		162,2	0,009	13,97	6,1
0,10	12	9,7	0,0058	13,97	4,0
0,25		24,3	0,0058	13,97	4,1
0,50		48,6	0,0059	13,97	4,1
1,00		97,3	0,0064	13,97	4,5
1,50		145,9	0,0071	13,97	4,9
2,00		194,6	0,0079	13,97	5,5

Um fato interessante é que o diâmetro também é importante no resultado da medição de vazão, não somente o nível da água nos coletores automatizados. Na Figura 14 são apresentadas as proporções de contribuição para a incerteza total, nota-se que o diâmetro chega a ser quase 50% de contribuição para a incerteza na maior vazão ($2,0 \text{ L h}^{-1}$). Portanto, deve-se determinar individualmente o diâmetro de cada coletor para estimar a vazão do gotejador. O tempo de 12 minutos tem contribuição próxima de zero para a incerteza total da medição de vazão. Em aprimoramentos futuros da bancada de ensaios, seria conveniente aumentar o comprimento e

reduzir o diâmetro do tubo-coletor a fim de melhorar a sensibilidade e a incerteza de medição do sistema de monitoramento de vazão.

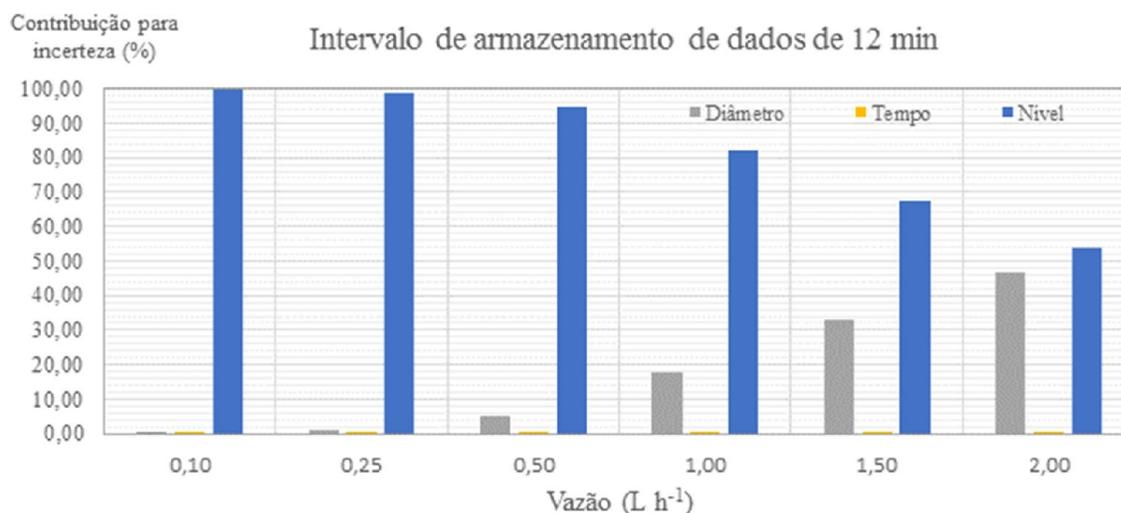


Figura 14 - Contribuição do diâmetro, tempo e do nível na incerteza total

4.2 Uniformidade de vazão entre linhas laterais

Para os ensaios de uniformidade de distribuição de vazão na linha de derivação com bifurcações simétricas com oito linhas laterais conectadas, foram selecionados 8 bocais que não tem diferença de vazão média para cada modelo. Na Tabela 8, estão tabulados os resultados dos testes e pressupostos da análise de variância da vazão das oito linhas laterais conectadas na linha de derivação com bifurcações simétricas, para cada um dos três modelos de bocais selecionados, instalados no final das linhas laterais.

Tabela 8 - Valores P das análises de variância e comparação de médias

Teste	Normalidade	Homogeneidade de variâncias		Resíduos normais	Resíduos não normais
Bocal	Shapiro-Wilk ¹	Levene ²	Bartlett ²	teste F ³	Kruskal-Wallis ³
3,8 mm	0,011	0,9971	----	----	0,94
2,0 mm	0,03	0,9793	----	---	0,07
1,5 mm	0,002	0,9983	----	----	0,31

¹ - Valor P < 0,05, vazões das linhas laterais não tem distribuição normal; ² - Valor P < 0,05, variâncias de vazões das 8 linhas laterais não são iguais; ³ - Valor P < 0,05, ao menos duas médias de vazão de linhas laterais são diferentes;

O pressuposto de normalidade não foi atendido para nenhum modelo de bocal, sendo que a família de transformações Box-Cox não normalizou os dados. Para os três modelos a análise de variância foi realizada pelo método não paramétrico de Kruskal-Wallis. Os valores P do teste de Levene são maiores que 0,05, portanto as variâncias de vazões das oito linhas

laterais são homogêneas para os três modelos de bocais. O valor P do teste de Kruskal-Wallis é maior que 0,05 para os três modelos de bocais, a vazão média das oito linhas laterais são iguais.

Nos gráficos da Figura 15, observa-se a vazão média das oito linhas laterais de tubos lisos, sem saída de vazão ao longo da linha (15A) e o número de Reynolds do escoamento (15B), considerando nos cálculos a viscosidade cinemática da água para a temperatura média de 30 °C igual a $0,801 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$. Para o bocal de 1,5 mm o regime de escoamento é de transição ($2000 \leq R < 4000$), para os bocais de 2,0 mm e 3,8 mm o regime de escoamento turbulento ($R \geq 4000$).

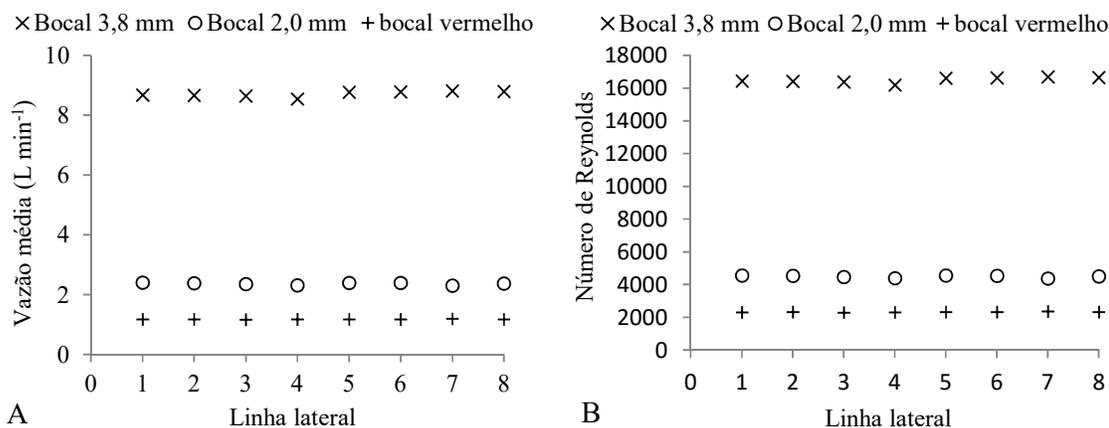


Figura 15 - A) Vazão média nas linhas laterais; B) Número de Reynolds

4.3 Análise gráfica da variabilidade e desvio das indicações de vazão

Os boxplot na Figura 16 representam vazões obtidas na bancada automatizada para cada gotejador avaliado no período de 48 horas. Já os pontos vermelhos são as vazões obtidas com o método da pesagem (MP). Para alguns gotejadores a variabilidade de vazão é grande e considerada outliers se for interpretada conforme as definições do boxplot, porém não serão consideradas outliers, pois essa variação entre leituras é característica do sensor utilizado no sistema de medição de vazão. Também é possível observar o desvio entre os valores obtidos por pesagem (MP) e pelo sistema automatizado, comparando-se a média de vazão representada pela linha preta dentro das caixas e o ponto vermelho para cada gotejador. A vazão média das leituras de vazão ficou próxima a média de vazão do MP para alguns gotejadores, enquanto para outros ficou distante até no máximo de $0,1 \text{ L h}^{-1}$ para o gotejador 8. Essa diferença nas medições de vazão é tolerável para sistemas de baixo custo como o utilizado. Um desvio de $0,1$

$L h^{-1}$ para a vazão de $1,94 L h^{-1}$ ocasiona um erro relativo de 5 %, valor condizente com a análise de incerteza, na qual foi obtida um valor máximo de incerteza expandida em relação ao fundo de escala da estimativa de vazão de 5,5 %.

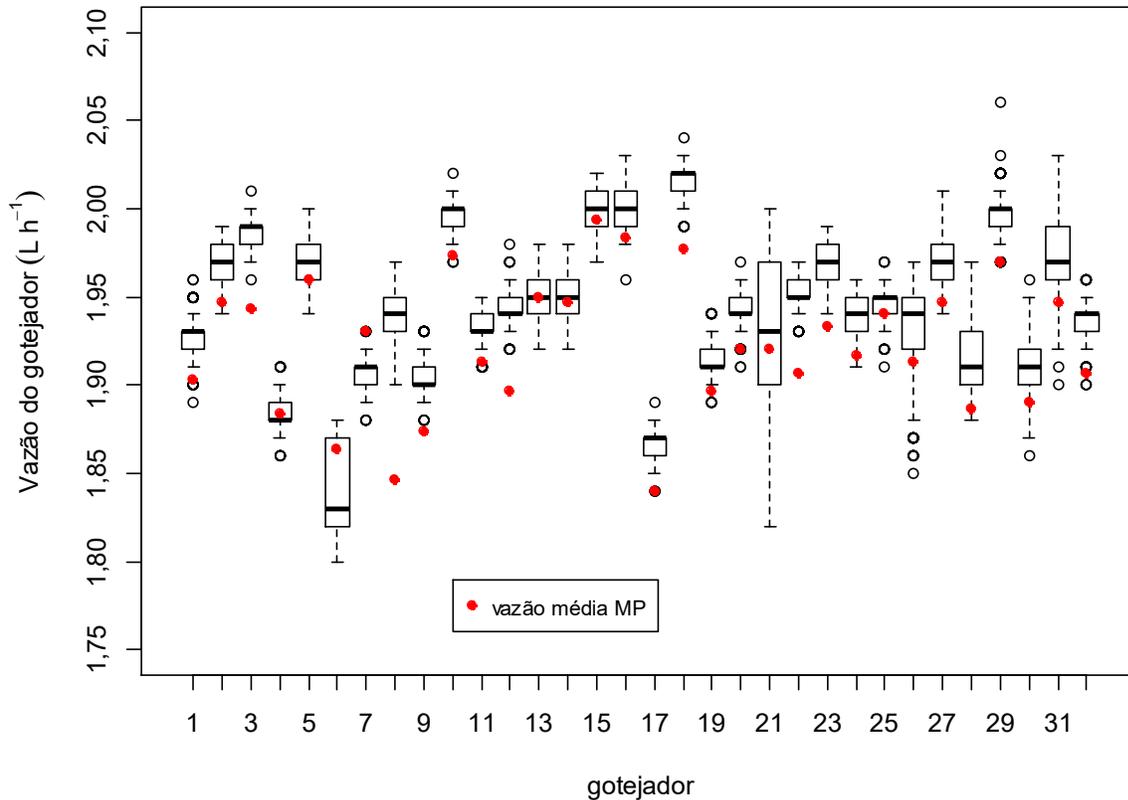


Figura 16 - Análise gráfica da variabilidade e desvio das indicações de vazão

Sensores de baixo custo precisam ser calibrados cuidadosamente e utilizados com cautela, já que podem apresentar instabilidades. O uso de ferramentas de controle estatístico de processos deve ser investigado em situações futuras (MONTGOMERY, 2009).

4.5 Obstrução dos gotejadores por partículas de areia

Na Figura 17 são apresentados 3 gráficos de razão de vazão versus tempo de ensaio, sendo um gráfico para cada granulometria: G1 (53 a 105 μm), G2 (105-250 μm) e G3 (250-500 μm), respectivamente. A cada 48 horas de ensaio, uma concentração (C) foi adicionada no reservatório, nos gráficos a separação das concentrações C1 (100 mg L⁻¹), C2 (250 mg L⁻¹) e C3 (500 mg L⁻¹) foi feita com linha tracejada vertical. As três velocidades de escoamento: V1 (0,13 m s⁻¹), V2 (0,25 m s⁻¹) e V3 (0,94 m s⁻¹) utilizadas nos ensaios estão representadas por linhas de cores vermelha, azul e verde, respectivamente. A linha tracejada horizontal de cor

amarela indica a razão de vazão de 75%, abaixo da qual os gotejadores são considerados obstruídos.

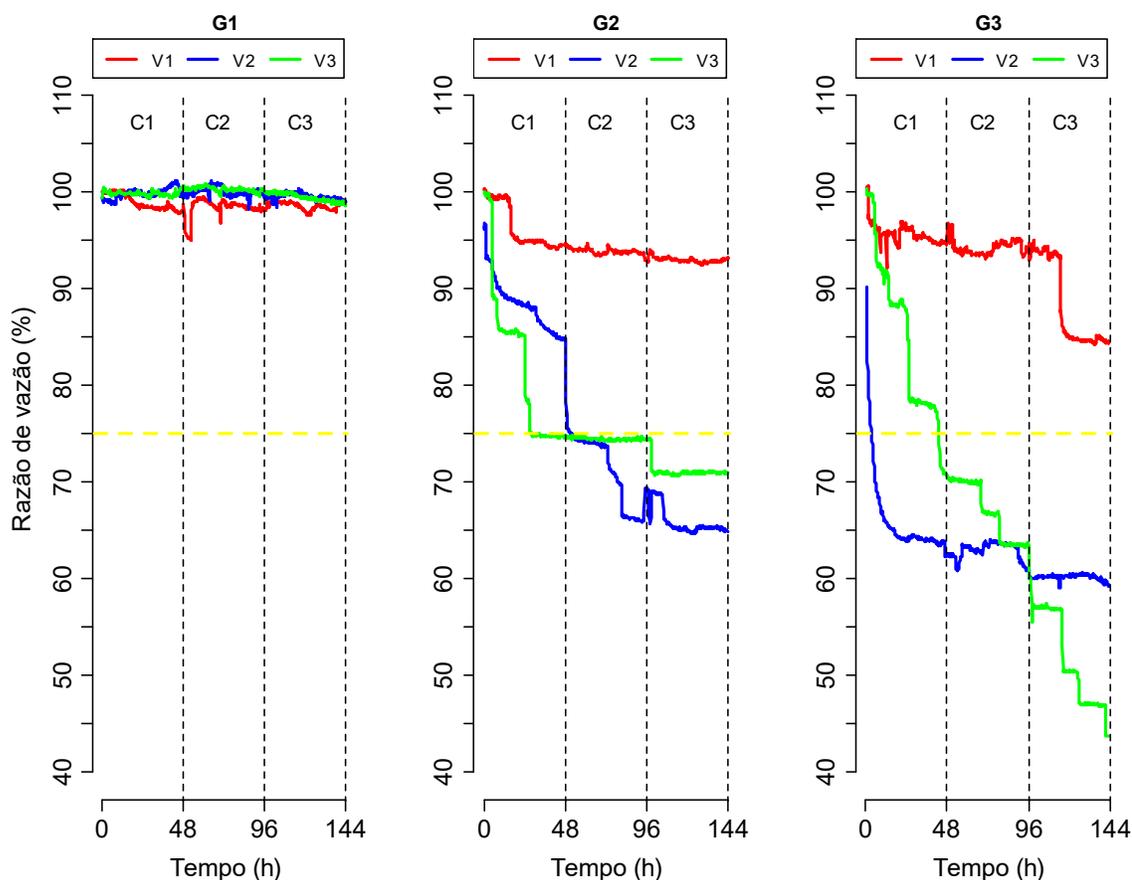


Figura 17 - Razão de vazão dos gotejadores para as combinações de granulometrias de partículas (G1, G2 e G3), velocidades de escoamento (V1, V2 e V3) e concentrações de partículas (C1, C2 e C3).

Para todas as combinações de velocidades e concentrações nos ensaios com a G1, a razão de vazão ficou acima de 95%, o que indica que o modelo de gotejador avaliado não é sensível a essa faixa granulométrica respeitando-se os limites de concentração estudados. No trabalho de Niu, Liu e Chen (2012) a razão de vazão para partículas com diâmetros na faixa de 58 a 100 μm ficou acima de 85%, para concentrações de 250, 500 mg L^{-1} e de até 2000 mg L^{-1} . Wei et al. (2008) avaliaram três modelos de gotejadores, e a razão de vazão ficou acima de 75% para combinação de diferentes tamanhos de partículas na faixa granulométrica de 45 a 180 μm e concentração de até 1000 mg L^{-1} . A faixa de tamanho de partículas em que não ocorreu obstrução no experimento de Wei et al. (2008), equivalente a toda a faixa da G1 e parte da faixa da G2 dessa pesquisa.

O lote de gotejadores é sensível a obstrução em ensaios com a G2 nas C2 e C3 para V2 e V3, enquanto na G3 para todas as concentrações nas V2 e V3.

Na V1, que corresponde a menor velocidade de escoamento da água na entrada das linhas laterais, não foi observada obstrução de gotejadores, sendo que a razão de vazão ficou acima de 75% para todas as combinações de granulometria e concentração. Esse resultado é inconsistente e não corresponde as condições reais observadas a campo, pois sabe-se que os problemas de obstrução são mais severos nos finais de linhas laterais onde as velocidades de escoamento favorecem a sedimentação e acúmulo de partículas (CAPRA; SCICOLONE, 1998). Os resultados obtidos para V1 são inválidos e justificam-se por uma falha na metodologia de ensaios adotada para as condições de escoamento da água nas linhas laterais. Durante os ensaios foi observado que aproximadamente 15 minutos após o início dos experimentos já não havia mais areia retornando para o reservatório, ou seja, assim que as partículas entravam nas linhas laterais, a velocidade de escoamento era insuficiente para manter as partículas em suspensão ($0,13 \text{ m s}^{-1}$). Desse modo, em um curto intervalo de tempo a maior parte das partículas rapidamente se depositava ao longo dos tubos e não atingia os gotejadores. Ao mesmo tempo, a concentração de partículas no tanque decaía para praticamente zero, não havendo mais nenhum potencial de obstrução. Na Figura 18A pode ser observada a deposição de areia no tubo gotejador na V1. Em pesquisas futuras visando o estudo de processos de obstrução em velocidades de escoamento menores que a velocidade de escoamento da água abaixo da qual ocorre a deposição de partículas, é essencial que haja monitoramento da concentração e adição periódica de partículas no reservatório, a fim de evitar resultados inconsistentes e conclusões incorretas.

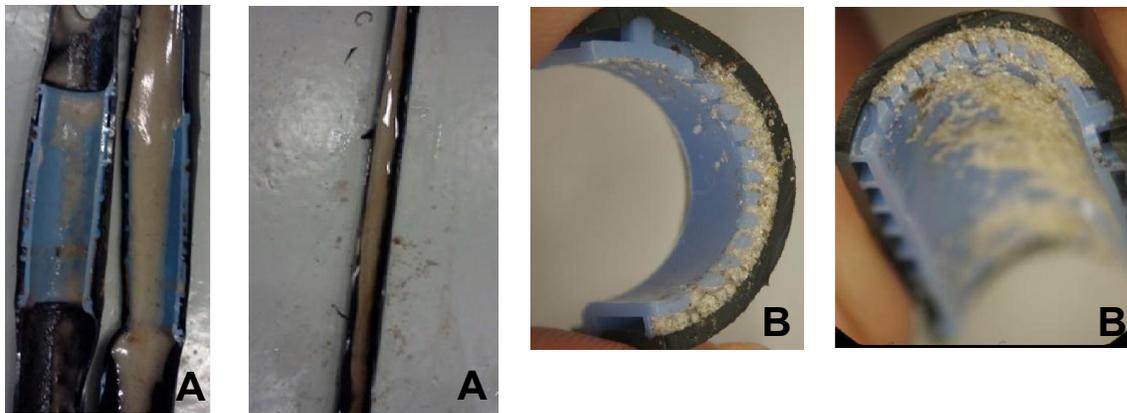


Figura 18 - A) Acúmulo de areia nos tubos gotejadores durante ensaio na V1. B) Obstrução do pré-filtro do gotejador ocasionada por partículas da granulometria 3, na V3

Na Figura 18B pode ser visualizada a obstrução de um gotejador causada pela aglomeração de partículas da G3 no pré-filtro dos gotejadores. No labirinto não foi observado acúmulo de partículas de areia.

4.5.1 Efeito da obstrução no coeficiente de variação de vazão (CVq)

Os coeficientes de variação de vazão iniciais dos gotejadores, obtidos antes da adição de areia na água destilada, são apresentados na Tabela 9. O coeficiente de variação de vazão obtido com água limpa ficou próximo de 2%, o que indica um excelente desempenho em termos de uniformidade de vazão.

Tabela 9 - Coeficiente de variação de vazão inicial

Ensaio	G1V1	G1V2	G1V3	G2V1	G2V2	G2V3	G3V1	G3V2	G3V3
CVq _(inicial) (%)	1,81	1,70	2,17	1,82	2,14	1,96	2,06	1,97	2,15

A diferença entre o CVq da Figura 19 e o CVq_(inicial) da Tabela 9 foi ocasionada pela obstrução dos gotejadores durante o ensaio de obstrução.

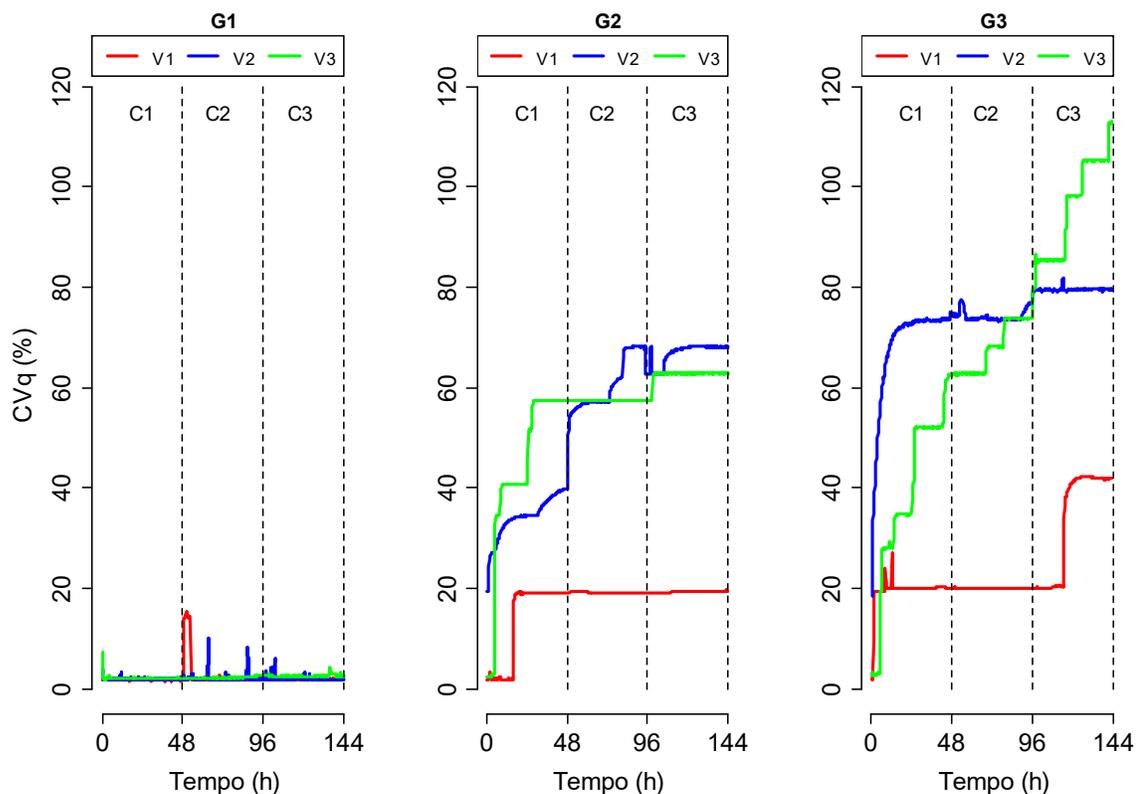


Figura 19 - Coeficiente de variação de vazão versus tempo

O CVq na G1 para V2 e V3 é menor que 10%, na V1 é menor que 10% na maior parte do tempo, com um pico na faixa entre 10 e 20%. Os picos são explicados por obstrução parcial, seguida de autolimpeza de alguns gotejadores, devido a variação da concentração de partículas em suspensão na água, conforme relatado em Adin e Sacks (1991).

Para G2 o CVq é maior que 40% no início da C2 na V2 e na metade da C1 para a V3, já na G3 é maior que 40% na C1 para V2 e V3.

Na V1 com a G3, o CVq ficou maior que 40% na metade do tempo da C3, já no critério da razão de vazão, os gotejadores não foram considerados obstruídos em nenhuma granulometria na V1. Essa diferença entre as metodologias, pode ser explicada porque a razão de vazão é uma razão de médias e suaviza a dispersão das vazões dos gotejadores. Já o CVq é uma medida de dispersão das vazões dos 32 gotejadores em relação à média, essa é mais sensível a variações de vazão entre os gotejadores. Outro ponto é que o CVq inclui a variação de vazão entre os 32 gotejadores devido à variação de fabricação, enquanto a razão de vazão é em relação a vazão inicial, que faz com que a variação de vazão seja somente devido à obstrução dos gotejadores.

4.5.2 Efeito do tratamento na obstrução dos gotejadores

Considerando o critério de obstrução de razão de vazão menor que 75%, pode ser observado nos dados da Tabela 10, que nos três tratamentos com a granulometria 1 não ocorreu a obstrução de nenhum gotejador. A G1 deve ser desconsiderada em ensaios de obstrução por partículas de areia, com o modelo de gotejador avaliado. Com as granulometrias 2 e 3 ocorreu a obstrução de mais gotejadores nas V2 e V3 que na V1. Nos tratamentos com a granulometria 2 ocorreu a obstrução de 9 e 8 gotejadores na V2 e V3, respectivamente.

Tabela 10 - Número de gotejadores obstruídos em cada tratamento

Tratamento	G1V1	G1V2	G1V3	G2V1	G2V2	G2V3	G3V1	G3V2	G3V3
Gotejadores obstruídos	0	0	0	1	9	8	4	12	16

No tratamento G3V1 ocorreu a obstrução de 4 gotejadores no total, sendo simultânea a obstrução dos gotejadores 4, 10 e 14 no tempo de ensaio de 115 horas. Já no tratamento G3V2 ocorreu a obstrução de 11 gotejadores em menos de 12 horas, esse tratamento deve ser considerado em ensaios de curta duração. Na combinação de G3 e V3, 16 gotejadores obstruíram na faixa de tempo de 5,2 a 141,8 horas, e apenas 1 gotejador obstruiu após 130 horas de ensaio.

Para o modelo de gotejador avaliado é recomendada filtragem de 160 mesh (retém partículas da G2 e G3). Em experimento realizado em condições de campo, Taylor et al. (1995) constataram que partículas com diâmetro na faixa de 0,360-1,08 mm, foram a causa da

obstrução de 207 dos 211 gotejadores obstruídos. Esse diâmetro de partículas equivale a parte da faixa da G3 da presente pesquisa. Porém deve-se lembrar que em situações de campo a obstrução tem como origem a ação individual ou combinada de agentes de natureza física, química e biológica. Nessas condições as partículas da G1 podem contribuir com a obstrução dos gotejadores, devido à aglomeração com outras partículas, precipitados e biofilmes.

Durante a análise dos dados obtidos nos experimentos, foi constatado que a obstrução dos gotejadores ocorre de forma aleatória, e que na maioria dos casos a obstrução ocorreu de forma abrupta, o gotejador reduz a vazão em curto período de tempo até obstruir, em menor frequência ocorre lenta redução de vazão até a obstrução. Isso condiz com as observações de Nakayama e Bucks (1991), que a obstrução parcial ou total de gotejadores pode ocorrer gradualmente ou instantaneamente.

Até ocorrer a obstrução dos gotejadores pode ocorrer o fenômeno de autolimpeza, verificado pelos picos de variação de vazão durante os ensaios, porém após obstruído o gotejador não desobstrui com o passar do tempo, mesmo em situações em que a motobomba desligou devido à interrupção da energia e foi religada. Já Adin e Sacks (1991) observaram que ocasionalmente ao acionar a motobomba ocorre a desobstrução de gotejadores.

5 CONCLUSÕES

Considerando o critério de razão de vazão menor que 75%, para definir o lote de gotejadores como obstruído. O modelo de tubo gotejador avaliado não é sensível à obstrução para todas as combinações de velocidades de escoamento da água nas linhas laterais e concentrações de partículas de areia na água, nos ensaios com partículas de areia na faixa granulométrica de 53 a 105 μm . Já para a faixa granulométrica de 105 a 250 μm , ocorreu a obstrução do lote de gotejadores nas concentrações de partículas de areia na água de 250 e 500 mg L^{-1} , nas velocidades de escoamento da água nas linhas laterais de 0,25 m s^{-1} e 0,94 m s^{-1} . Na terceira faixa granulométrica de partículas de areia (250 a 500 μm), ocorreu a obstrução do lote de gotejadores para todas as concentrações de areia na água, nas velocidades de escoamento da água nas linhas laterais de 0,25 m s^{-1} e 0,94 m s^{-1} . Para todas as combinações de faixas granulométricas de partículas de areia e concentração de partículas de areia na água, na velocidade escoamento da água nas linhas laterais de 0,13 m s^{-1} não ocorreu a obstrução do lote de gotejadores devido à uma falha na metodologia proposta para essa velocidade de escoamento da água nas linhas laterais.

A bancada automatizada desenvolvida permitiu o monitoramento contínuo e individual da vazão de cada um dos trinta e dois gotejadores avaliados durante os ensaios de obstrução, sendo que o sistema de monitoramento apresentou incerteza na medição de vazão adequada para o propósito do trabalho.

REFERÊNCIAS

ADIN, A.; ALON, G. Mechanisms and Process Parameters of Filters Screens. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 112, n. 4, p. 293–304, 1986.

ADIN, A.; ELIMELECH, M. Particle Filtration for Wastewater Irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 115, n. 3, p. 474–487, 1989.

ADIN, A.; SACKS, M. Dripper-Clogging Factors in Wastewater Irrigation. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 117, n. 6, p. 813–826, 1991.

AMERICAN SOCIETY OF AGRICULTURAL ENGINEERS STANDARDS. **EP 405.1**: design and installation of microirrigation systems. St. Joseph, 2003. 5p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 9261**: equipamentos de irrigação agrícola – emissores e tubo emissores – especificação e métodos de ensaio. Rio de Janeiro, 2006. 17p.

BOUNOUA, S. **Etude du colmatage des systémes d'irrigation localise´e**. 2010. 129p. PhD Thesis – University of Marseille, Marseille, 2010.

BRALTS, V.; WU, I.; GITLIN, H. Drip Irrigation Uniformity Considering Emitter Plugging. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 24, n. 1, p. 113 -119, 1981.

CAMARGO, A, P.; MOLLE, B.; TOMAS, S.; FRIZZONE, J, A. Assessment of clogging effects on lateral hydraulics: proposing a monitoring and detection protocol. **Irrigation Science**, New York, v. 32, n. 3, p. 181–191, 2013.

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

COELHO, R.D.; VILELA, L.A.A.; RESENDE, R.S.; MARCONI, B.T.; SÁ, J.S de. Entupimento de gotejadores em decorrência de pulsos de partículas sólidas na malha hidráulica., **Irriga**, Botucatu, v. 12, n. 1, p. 108-122, 2007.

DURAND, R.; CONDOLIOS, E. Étude expérimentale du refoulement des materiaux en conduite. **2èmes Journées de l’Hydraulique**, Grenoble, France: Societe Hydrotechnique de France, 1952.

DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R de. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 96, n. 1, p. 67-79, 2009.

ESTADOS UNIDOS. Departament of Agriculture. **National Engineering Handbook: trickle irrigation**. Washington, 2013. 230 p. (USDA. NRCS Irrigation Handbooks, Seção 15). Disponível em: <<http://directives.sc.egov.usda.gov/OpenNonWebContent.aspx?content=34517.wba>>. Acesso em: 22 out. 2014.

FAO. **Irrigation and Dranaige: water quality for agriculture**. Roma, 1994. 65p. (FAO. Paper, 29).

FARIA, L.A. **Proposta de Norma Técnica de Ensaio para Tubogotejadores de Irrigação: Resistência ao Entupimento por Particulados Sólidos em Suspensão**. 2013. 129p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2013.

GILBERT, R.G.; NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Trickle Irrigation: Prevention of Clogging. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 22, n. 3, p. 514 -519, 1979.

GILBERT, R.G.; NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A.; FRENCH, O.F.; ADAMSON, K.C. Trickle irrigation: emitter clogging and other flow problems. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 3, n. 3, p. 159-178, 1981.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 8486-1**: bonded abrasives - determination and designation of grain size distribution - pt 1: Macrogrits F4 to F220. Geneva, 1996. p.

_____. **ISO/TC 23/SC 18/WG 5 N 4**: clogging test methods for emitters. Marseille, 2003. 26p.

LAMM, F.R.; AYARS, J.E.; NAKAYAMA, F.S. **Micro irrigation for crop production**: Design, Operation and Management. Amsterdam: Elsevier, 2007. 642p.

LI, Y.; ZHOU, B.; LIU, Y.; JIANG, Y.; PEI, Y.; SHI, Z. Preliminary surface topographical characteristics of biofilms attached on drip irrigation emitters using reclaimed water. **Irrigation Science**, New York, v. 31, n. 4, p. 557-574, 2012.

MONTGOMERY, D.C. **Introdução ao controle estatístico da qualidade**. 4. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009. 513p.

Nalco Company. **The Nalco Water Handbook**. 2nd. ed. New York: McGraw-Hill, 2009. 1346p.

NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. **Irrigation Science**, New York, v. 12, n. 3, p. 187-192, 1991.

NIU, W.; LIU, L.; CHEN, X. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. **Irrigation Science**, New York, v. 31, n. 4, p. 545-555, 2012.

PINTO, M.F.; CAMARGO, A.P.; ALMEIDA, A.C.S.; ALVES, D.G.; BOTREL, T.A. Desenvolvimento de um sistema para o controle do pH da água para microirrigação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 15, n. 2, p. 211-217, 2011.

PUIG-BÁRGUÉS, J.; LAMM, F.R. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in microirrigation driplines. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 56, n. 5, p. 1821-1828, 2013.

PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, S.; ELBANA, M.; DURAN-ROS, M.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F. R. de.; LAMM, F. R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in microirrigation with effluents. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 97, n. 6, p. 883-891, 2010.

QINGSONG, W.; GANG, L.; JIE, L.; YUSHENG, S.; WENCHU, D.; SHUHUAI, H. Evaluations of emitter clogging in drip irrigation by two-phase flow simulations and laboratory experiments. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 63, n. 2, p. 294-303, 2008.

RETTORE NETO, O.; BOTREL, T. A.; FRIZZONE, J. A.; CAMARGO, A. P. Method for determining friction head loss along elastic pipes. **Irrigation Science**, New York, v. 32, n. 5, p. 329-339, 2014.

RICHTER, C.A. **ÁGUA: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. 340p.

SHANNON, W.M.P.E.; JAMES, L.G.; BASSETT, D.L.; MIH, W.C. Sediment transport and deposition in trickle irrigation laterals. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 25, n. 1, p. 160-164, 1982.

TAYLOR, H.D.; BASTOS, R.K.X.; PEARSON, H.W.; MARA, D.D. Drip irrigation with waste stabilisation pond effluents: solving the problem of emitter fouling. **Water Science and Technology**, London, v. 31, n. 12, p. 417-424, 1995.

TEIXEIRA, M.B; COELHO, R.D.; CUNHA, F.N.; SILVA, N. F. da. Curva característica da vazão de gotejadores em diferentes temperaturas da água e ação do cloro ou ácido. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v. 8, n. 3, p. 220-233, 2014.

VEKARIYA, P.B.; SUBBAIAH, R.; MASHRU, H.H. Hydraulics of microtube emitters: a dimensional analysis approach. **Irrigation Science**, New York, v. 29, n. 4, p. 341-350, 2011.

WANG, J. Theory of flow distribution in “manifold”s. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 168, n. 3, p. 1331–1345, 2011.

WEI, Q.; SHI, Y.; LU, G.; DONG, W.; HUANG, S. Rapid Evaluations of Anticlogging Performance of Drip Emitters by Laboratorial Short-Cycle Tests. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 134, n. 3, p. 298–304, 2008.

WU, I.P. An assessment of hydraulic design of micro-irrigation systems. **Agriculture Water Management**, Amsterdam, v. 32, n. 3, p. 275–284, 1997.

YILDRIM, G. Discussion of “Rapid Evaluations of Anticlogging Performance of Drip Emitters by Laboratorial Short-Cycle Tests” by Quingsong Wei, Yusheng Shi, Gang Lu, Wenchu Dong, and Shuhuai Huang. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 135, n. 6, p. 806–808, 2009.

ZHANG, J.; ZHAO, W.; TANG, Y.; LU, B. Anti-clogging performance evaluation and parameterized design of emitters with labyrinth channels. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 74, n.1, p. 59-65, 2010.

ZHU, D.L.; WU, P.T.; MERKLEY, G.P.; JIN, J. Drip irrigation lateral design procedure based on emission uniformity and field microtopography. **Irrigation and Drainage**, New York, v. 59, n. 5, p. 535–546, 2010.