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

Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores

Marcus Vinicius Talamini Junior

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Marcus Vinicius Talamini Junior
Engenheiro Agrônomo

Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

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

Talamini Junior, Marcus Vinicius

Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores / Marcus Vinicius Talamini Junior - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

58 p.

Dissertação (Mestrado) – USP / Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”.

1. Obstrução 2. Irrigação por gotejo 3. Areia 4. Gotejamento 5. Irrigação
I. Título

DEDICO

À minha família, principalmente à minha irmã, Larissa Lachi Talamini, por tudo.

In memoriam à Iara A. Talamini, uma vida dedicada a outras vidas.
In memoriam à Ian F. Kilmister, pela grandiosa contribuição cultural.
In memoriam à Carl. E. Sagan, por mostrar que a vida pode ter algum sentido.

"I don't want to believe, I want to know."
—Carl E. Sagan—

AGRADECIMENTOS

Ao professor José Antônio Frizzzone, por ter aceitado a dura tarefa de ser meu orientador e me ter concedido o privilégio de ter sido seu orientado.

Ao técnico do laboratório e agora professor Antonio Pires de Camargo, por ter me guiado em meio a tantas questões.

À equipe de pós-graduandos do LEMI, Fabrício Correia de Oliveira, Rogério Lavanholi, Hermes Soares da Rocha, Wagner W. A. Bombardelli (colega de sala), Diego Sousa, Ana Cláudia S. De Araújo pelas dicas, conselhos, ensinamentos e conversas.

Aos outros pós-graduandos do Departamento de Engenharia de Biosistemas, Otávio Neto Almeida Santos, Éder D. Fanaya Jr., Luiz R. Sobenko pelos momentos de descontração.

Aos funcionários do departamento, Gil, Seu Antônio, Luiz por terem me auxiliado com os equipamentos, reagentes e especialmente à Paulinha, por tudo, no laboratório.

Aos pós-graduandos Gregori Rovadoski, Leonardo Maldaner e Humberto T. Menecheli Filho pelo companheirismo.

À Jaqueline Puehler, pelo imensurável suporte durante toda a tormenta.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo suporte financeiro à Pesquisa, e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela disponibilização da Bolsa de Estudos.

À Gloriosa Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ-USP) por me permitir completar mais essa etapa.

A todos aqui não nomeados que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

RESUMO.....	7
ABSTRACT	8
LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS	11
1. INTRODUÇÃO.....	13
2. REVISÃO DE LITERATURA	15
2.1. IRRIGAÇÃO POR GOTEJAMENTO.....	15
2.2. OBSTRUÇÃO DE EMISSORES	16
2.3. OBSTRUÇÃO POR PARTÍCULAS SÓLIDAS	17
2.4. REPETITIVIDADE E REPRODUTIBILIDADE DE ENSAIOS.....	19
3. MATERIAL E MÉTODOS	21
3.1. GOTEJADORES.....	21
3.2. BANCADA E ROTINA DE ENSAIOS.....	22
3.3. PREPARAÇÃO DA AREIA	23
3.4. CONTROLE DO ENSAIO E COLETA DE DADOS	26
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29
4.1. RESULTADOS GERAIS DOS ENSAIOS DE OBSTRUÇÃO.....	29
4.2. TEMPERATURA DA ÁGUA	40
4.3. pH DA ÁGUA.....	41
4.4. CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	41
4.5. OBSTRUÇÃO DOS EMISSORES	42
4.6. POSIÇÃO NA LINHA DO GOTEJADOR OBSTRUÍDO, PARA O MODELO DE VAZÃO 0,6 L H ⁻¹	47
5. CONCLUSÕES.....	49
REFERÊNCIAS.....	51
ANEXOS.....	55

RESUMO

Concentração e granulometria de partículas de areia na obstrução de gotejadores

O principal problema da irrigação por gotejamento é a obstrução dos emissores. Dentre os diversos agentes causadores da obstrução, os de natureza física se mostram, de acordo com estudos feitos até o momento, os de maior importância e ocorrência. Esse problema acarreta graves consequências para o sistema de irrigação, seja por efeito na uniformidade de aplicação de água, ou por redução da vida útil do sistema. Até o momento não existe uma norma técnica que especifica a metodologia a ser utilizada para se testar a sensibilidade de gotejadores à obstrução, todavia, o *Plateforme de Recherche et d'expérimentation en Sciences et Technologies d'Irrigation de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies de l'Environnement et l'Agriculture* (PReSTI/IRSTEA) propôs um procedimento para avaliar materiais comerciais de irrigação que vem sendo utilizado há 40 anos. Tomando-se em conta esse método e pesquisas realizadas anteriormente pelo Laboratório de Ensaio de Materiais de Irrigação (LEMI/ESALQ), foi feito um estudo para avaliar a influência da granulometria e da concentração de partículas de areia no processo de obstrução de gotejadores, eliminando-se outros agentes de obstrução, de origem física, química ou biológica. Para tal finalidade, foram escolhidos quatro modelos de gotejadores previamente testados no LEMI (Drip-Tech 1,2 e 1,6 L h⁻¹ e Taldrip 0,6 e 1,7 L h⁻¹). Um solo natural foi utilizado para a obtenção de partículas de areia, o qual passou por um processo de preparação através da destruição de matéria orgânica, dispersão das partículas presentes e peneiramento de partículas para separação de acordo com suas dimensões. A areia foi separada em 3 faixas granulométricas: de 63 a 125 µm, de 125 a 212 µm e de 212 a 500 µm. Cada faixa granulométrica foi testada com quatro concentrações: 125 mg L⁻¹, 250 mg L⁻¹, 375 mg L⁻¹ e 500 mg L⁻¹. O composto de partículas sólidas correspondente a cada condição de ensaio foi misturado em água deionizada, num reservatório de 200 L. Cada combinação de granulometria e concentração era testada por 40 h, sendo 8 h por dia, totalizando 5 dias úteis. Para evitar crescimento microbiano, cloro era adicionado diariamente. Observou-se que os 3 modelos de gotejador de maior vazão não se mostraram susceptíveis à obstrução por partículas de areia, enquanto o modelo de vazão 0,6 L h⁻¹ apresentou obstrução severa em todos os casos, assim como um comportamento anômalo na concentração de 125 mg L⁻¹ da faixa granulométrica 63 a 125 µm, pois a obstrução aqui se mostrou mais severa do que nos casos de diferentes concentração dessa mesma faixa granulométrica. Independente de qual granulometria ou concentração era utilizada, no modelo de vazão 0,6 L h⁻¹, não foi possível diferenciar o efeito da granulometria e da concentração nesse processo.

Palavras-chave: Entupimento; Microirrigação; Areia; Gotejamento; Irrigação

ABSTRACT

Sand particles concentration and size in the clogging of drip emitters

The main problem in drip irrigation is the clogging of emitters. Among the many agents participating in the clogging process, the ones of physical nature, according to studies performed until now, the most important and occurrent ones. This problem has serious consequences for the irrigation system, either by influencing the water application uniformity or reducing the system lifespan. So far, there is no technical standard that specifies the methodology to be used when testing drippers' sensitivity to clogging, nonetheless, the *Plateforme de Recherche et d'expérimentation en Sciences et Technologies d'Irrigation de l'Institut National de Recherche en Sciences et Technologies de l'Environnement et l'Agriculture* (PReSTI/IRSTEA) did propose a method to evaluate commercial irrigation material that has been used for 40 years. Considering this method and research previously performed at the Irrigation Material Testing Laboratory (LEMI/ESALQ), a study was performed trying to identify the influence of sand particles' size and concentration on the emitter clogging process, controlling clogging agents of other nature, either of physical, chemical or biological nature. To achieve this objective, four emitters models, previously tested at LEMI were selected (Drip 1,2 and 1,6 L h⁻¹ and Taldrip 0,6 and 1,7 L h⁻¹). A natural soil was collected to obtain sand particles, it went under a chemical treatment by having its organic matter removed, solid particles dispersed and subsequently sieved to separate it according to its size. Sand was separated in 3 size ranges (from 63 to 125 µm, from 125 to 212 µm and from 212 to 500 µm). Each size range was tested in four different concentrations (125 mg L⁻¹, 250 mg L⁻¹, 375 mg L⁻¹ and 500 mg L⁻¹). The water used in this experiment was deionized, to avoid the presence of salts and the solution of water and sand was previously prepared, before being used, in a reservoir containing 200 L of capacity. Each combination of particle size and concentration was tested for 40h, or 8h a day, for 5 days. To avoid microbial microorganism growth, chlorine was added daily to the water. The 3 emitter models with higher flow rates had no sensitivity to the clogging process under this experiment conditions, nonetheless, the model of flow rate 0,6 L h⁻¹ was severely clogged on all cases, no matter the particle size or concentration and there was an anomalous behavior for the concentration 125 mg L⁻¹ from the 63 to 125 µm size range, for here clogging was much more severe than the other concentrations from the same size range. Independently from the particle size range and concentration on the test, the effects of each component isolated were not detectable in this process.

Keywords: Clogging; Drip irrigation; Sand; Dripping; Irrigation

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1. DIMENSÕES DOS MODELOS DE GOTEJADOR USADOS NO EXPERIMENTO: A) TALDRIP 0,6 L H ⁻¹ ; B) TALDRIP 1,7 L H ⁻¹ ; C) DRIP-TECH 1,6 L H ⁻¹ E DRIP-TECH 1,2 L H ⁻¹ ; D) DIMENSÕES DOS LABIRINTOS DOS EMISSORES TALDRIP 0,6 L H ⁻¹ ; E) TALDRIP 1,7 L H ⁻¹ E F) DRIP-TECH 1,2 L H ⁻¹ ; DRIP-TECH 1,6 L H ⁻¹ (LAVANHOLI, 2016).....	21
FIGURA 2. REPRESENTAÇÃO DA BANCADA E SEUS COMPONENTES (LAVANHOLI, 2016).....	22
FIGURA 3. (A) BANCADA DE ENSAIOS; (B) MOTOBOMBA COM ROTOR E CARCAÇA EM INOX, UTILIZADA NO EXPERIMENTO; (C) CALHA DE COLETA DA ÁGUA COM AREIA; (D) COLETORES UTILIZADOS PARA DETERMINAÇÃO DE VAZÃO.....	23
FIGURA 4. LINHA DE DERIVAÇÃO COM BIFURCAÇÕES SIMÉTRICAS USADA PARA EVITAR TENDÊNCIAS DE FLUXOS ENTRE AS LINHAS LATERAIS (PERBONI, 2016).....	23
FIGURA 5. (A) PORCENTAGEM EM MASSA (%) DAS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS USADAS NO TRABALHO E CARACTERIZAÇÃO DAS RESPECTIVAS SUB-FAIXAS GRANULOMÉTRICAS, (B) 63–125 µM, (C) 125–212 µM E (D) 212–500 µM	25
FIGURA 9. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 1: 63–125 µM E CONCENTRAÇÃO 1: 125 MG L ⁻¹ (C1G1): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	29
FIGURA 10. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 1: 63–125 µM E CONCENTRAÇÃO 2: 250 MG L ⁻¹ (C2G1): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	30
FIGURA 11. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 1: 63–125 µM E CONCENTRAÇÃO 3: 375 MG L ⁻¹ (C3G1): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	31
FIGURA 12. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 1: 63–125 µM E CONCENTRAÇÃO 4: 500 MG L ⁻¹ (C4G1): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	32
FIGURA 13. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 2: 125–212 µM E CONCENTRAÇÃO 1: 125 MG L ⁻¹ (C1G2): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	33
FIGURA 14. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 2: 125–212 µM E CONCENTRAÇÃO 2: 250 MG L ⁻¹ (C2G2): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	34
FIGURA 15. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 2: 125–212 µM E CONCENTRAÇÃO 3: 375 MG L ⁻¹ (C3G2): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA	35

FIGURA 16. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 2: 125–212 μM E CONCENTRAÇÃO 4: 500 MG L^{-1} (C4G2): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....36

FIGURA 17. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 3: 212–500 μM E CONCENTRAÇÃO 1: 125 MG L^{-1} (C1G3): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....37

FIGURA 18. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 3: 212–500 μM E CONCENTRAÇÃO 2: 250 MG L^{-1} (C2G3): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....38

FIGURA 19. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 3: 212–500 μM E CONCENTRAÇÃO 3: 375 MG L^{-1} (C3G3): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....39

FIGURA 20. RESULTADOS DAS DUAS REPETIÇÕES DO ENSAIO REALIZADO NA GRANULOMETRIA 3: 212–500 μM E CONCENTRAÇÃO 4: 500 MG L^{-1} (C4G3): (A) NÚMERO DE EMISSORES OBSTRUÍDOS (LINHA HORIZONTAL VERMELHA INDICA O NÚMERO LIMITE DE EMISSORES OBSTRUÍDOS QUE CARACTERIZA OBSTRUÇÃO DO LOTE AVALIADO); (B) TEMPERATURA DA ÁGUA; (C) PH DA ÁGUA; (D) CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DA ÁGUA.....40

FIGURA 22. EMISSORES MODELO 1,7 L H^{-1} OBSTRUÍDO POR PARTÍCULAS DE AREIA DE FAIXA GRANULOMÉTRICA 125 – 212 μM NA CONCENTRAÇÃO 125 MG L^{-1} (A), COMPARADO COM EMISSOR LIMPO (B)43

FIGURA 23. EMISSORES DE MODELO DE VAZÃO 0,6 L H^{-1} OBSTRUÍDOS, COM AREIA DA FAIXA GRANULOMÉTRICA DE 63–125 μM , CONCENTRAÇÃO DE 125 MG L^{-1}45

FIGURA 24. EMISSOR DE VAZÃO 0,6 L H^{-1} OBSTRUÍDO: (A) NA FAIXA GRANULOMÉTRICA 125–212 μM , CONCENTRAÇÃO 125 MG L^{-1} ; (B) NA FAIXA GRANULOMÉTRICA 212–500 μM , CONCENTRAÇÃO 250 MG L^{-1} ; (C) NOVAMENTE NA FAIXA GRANULOMÉTRICA 125–212 μM , CONCENTRAÇÃO 125 MG L^{-1} ; (D) NOVAMENTE NA FAIXA GRANULOMÉTRICA 125–212 μM , CONCENTRAÇÃO 125 MG L^{-1} ..46

FIGURA 25. NÚMERO DE OBSTRUÇÕES, POR POSIÇÃO (ORDEM) DO EMISSOR NAS LINHAS 1 E 2, DO MODELO DE 0,6 L H^{-1} DURANTE TODO O EXPERIMENTO, CONSIDERANDO TODAS AS FAIXAS GRANULOMÉTRICAS E CONCENTRAÇÕES DE PARTÍCULAS NA ÁGUA.....47

LISTA DE TABELAS

TABELA 1. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DOS EMISSORES SELECIONADOS	22
TABELA 2. LIMITES DE TAMANHO, EM μM , DE CLASSE DE PARTÍCULA, USADOS NESSE TRABALHO	24
TABELA 3. PORCENTAGEM EM MASSA DE CADA FRAÇÃO GRANULOMÉTRICA PRESENTE NO SOLO COLETADO	24
TABELA 4. COMBINAÇÕES DE GRANULOMETRIA E CONCENTRAÇÃO DE PARTÍCULAS DE AREIA	26

1. INTRODUÇÃO

O problema da obstrução de emissores é bastante frequente e importante, sendo assunto de pesquisa há vários anos. Muito se tem aprendido sobre os fatores que influenciam na obstrução de gotejadores e as condições nas quais ocorrem, todavia os processos de obstrução ainda não são plenamente compreendidos. Embora se conheçam algumas condições nas quais a obstrução ocorra, a influência de cada fator no desenvolvimento do processo ainda é pouco conhecida.

A obstrução de emissores é um processo que pode ter origens classificadas como física, química ou biológica. Fatores de origem física são partículas, tais como areia, argila e silte que entram no sistema e criam uma barreira de impedimento à passagem da água; os de origem química são sais precipitados, que se acumulam causando a obstrução; e, os de origem biológica, são biofilmes originados de microrganismos. Nota-se que esses fatores, comumente, atuam em conjunto no campo.

Pesquisas tem demonstrado que diferentes modelos de emissor, submetidos às mesmas condições de trabalho apresentam respostas diferentes à susceptibilidade à obstrução. Face ao grande número de modelos de emissores no mercado, é necessária uma metodologia padronizada que permita identificar o risco que um dado modelo apresenta, para contribuir com medidas a serem adotadas de maneira a mitigar os danos, tais como o dimensionamento do sistema de filtragem e/ou técnicas de tratamento da água.

Não existe ainda uma norma específica e padronizada para dar suporte aos ensaios de avaliação da obstrução de emissores, em que sejam adequadamente reproduzidas as condições de campo sob as quais o equipamento opera. Vários estudos sobre sensibilidade à obstrução têm usado diferentes metodologias de ensaio. Quando essa metodologia ou estrutura onde é feito o ensaio é inadequada, os resultados podem ser pouco confiáveis, ou podem não reproduzir condições de trabalho em campo.

É imprescindível também que o procedimento e os ensaios realizados tenham adequada repetitividade e reprodutibilidade, de maneira que o mesmo material propicie resultados similares em testes, mesmo quando for avaliado por diferentes instituições e equipes de pesquisadores. De um ponto de vista de viabilidade técnica é necessário que o ensaio seja financeiramente exequível, com tempo de duração viável, mas que seja representativo para assegurar a adequada avaliação do equipamento em questão. Fatores e níveis de ensaio não podem ser escalados de maneira arbitrária e necessitam de argumentos técnicos, obtidos através de pesquisa, para fundamentar um procedimento pertinente.

Uma proposta de norma de avaliação da sensibilidade de emissores à obstrução está em fase de elaboração pelo comitê ISO/TC 23/SC 18 – “Irrigation and drainage equipment and systems”, que conta com a participação do pesquisador Bruno Molle, gerente do PReSTI/IRSTEA, que lidera o projeto de proposta de norma, de maneira conjunta ao referido comitê. Em razão da grande complexidade e ainda falta de compreensão completa dos processos de obstrução, além de divergências de opiniões presentes no comitê da ISO, deixou-se clara a necessidade por argumentos teóricos de apoio à definição de requisitos e procedimentos de ensaio de uma futura norma técnica.

Baseadas nisso, pesquisas vem sendo realizadas, relacionadas à mecanismos de obstrução, entre o Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Engenharia de Irrigação na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (LEMI/INCT–EI/ESALQ/USP) e o PReSTI/IRSTEA. O trabalho desenvolvido faz parte desse conjunto de pesquisas, realizadas em parceria, e buscou

fornecer suporte técnico—científico para a norma ISO em construção. Neste trabalho foi utilizada metodologia similar à do PReSTI/IRSTEA, descrita mais adiante.

Restringindo-se aos fatores físicos do processo de obstrução, ainda há deficiência de entendimento de como decorre esse processo e de como seria um protocolo ideal para avaliar obstrução causada por partículas sólidas. A hipótese desse trabalho foi de que diferentes tamanhos (granulometria) e diferentes quantidades (concentração) de partículas de areia suspensas na água, assim como a interação entre esses fatores, influenciam na intensidade de obstrução de gotejadores. Dessa maneira, é possível que um protocolo de avaliação de sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas deva considerar ambos os fatores.

O objetivo dessa pesquisa foi avaliar a influência da granulometria e da concentração de partículas de areia na dinâmica da vazão de gotejadores e na correspondente sensibilidade dos emissores à obstrução causada por essas partículas sólidas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Irrigação por gotejamento

O sistema de irrigação por gotejamento, também chamado de microirrigação, é um tipo de sistema no qual o fornecimento de água para as plantas ocorre diretamente na região radicular, não havendo contato da água com as folhas e caule e aumento de umidade na atmosfera local dessas partes da planta, como ocorre, por exemplo, nos sistemas de aspersão.

São características do sistema por gotejamento a aplicação da água em baixa intensidade (baixa vazão) e alta frequência (geralmente se irriga uma vez por dia ou uma vez a cada dois dias). Quando bem manejado, a umidade do solo é mantida sempre em um patamar bastante próximo às condições hídricas ideais de cultivo da cultura (BERNARDO, SOARES, MANTOVANI, 2006). Essas condições podem variar de acordo com o objetivo comercial da cultura, pois, em algumas espécies (como por exemplo o melão e a uva), os frutos apresentam qualidade superior (medida, por exemplo, em teor de açúcares) quando a cultura está submetida a um certo nível de déficit hídrico, mesmo possuindo tamanho e massa menores do que frutos submetidos a um regime de irrigação repondo toda a capacidade de água no solo (ZHENG, 2009).

A irrigação por gotejamento é um sistema, de método localizado, com vantagens bastante interessantes sobre outros métodos, tais como o menor crescimento e incidência de plantas invasoras (BRAR et al. 2016), menor incidência de atividade de patógenos e doenças por não aumentar a umidade na copa das plantas (AYARS, FULTON, TAYLOR, 2015) a alta uniformidade de aplicação e a alta eficiência de aplicação, devido às poucas perdas de água e evitar a dispersão de aerossóis presentes em águas do efluente, todavia, ressalta-se que uma grande desvantagem desse sistema é a fácil obstrução dos emissores do sistema, o que reduz consideravelmente a uniformidade de aplicação (BAHAR et al., 2010) e faz com que o volume disponibilizado para irrigação seja maior (CAPRA, 1998).

Uma alta uniformidade de aplicação de água é imperativa para que o sistema seja eficiente, e para isso é necessário que, em campo, o agricultor verifique se as condições de funcionamento previstas em projeto se confirmam, todavia, esse é um aspecto que os produtores rurais têm dado pouca importância. Embora tenham acesso a tal tecnologia, ela não é usada corretamente, seja por falta de orientação ou conhecimento (DA SILVA e DA SILVA, 2005).

A origem da variação dessa uniformidade tem relação com a sensibilidade do equipamento utilizado à temperatura da água, à pressão de operação, fabricação do equipamento e seus modelos, variações de origem topográfica, perdas de carga e a obstrução dos emissores (VEKARIYA et al., 2011). Essa obstrução é o processo mais significativo e maior responsável na redução da uniformidade de distribuição da água, tal qual redução na vida útil dos equipamentos (BUCKS, NAKAYAMA, GILBERT, 1979; CAMARGO et al., 2013).

De um ponto de vista econômico, a irrigação por gotejamento pode se mostrar mais interessante que outros métodos, devido ao fato de necessitar menor pressão para operar e, como as perdas de água serem menores, menos água precisa ser bombeada, reduzindo os gastos com água e eletricidade (PAWAR et al. 2015). Sendo assim, a resposta do cultivo para cada unidade monetária investida na irrigação é maior (VON WESTARP, CHIENG, SCHREIER, 2004). Essas características tornam os sistemas de irrigação por gotejamento economicamente viáveis, mesmo considerando seus altos custos de implantação (WOLTERING et al. 2011).

2.2. Obstrução de emissores

A obstrução de emissores é um problema complexo havendo numerosas tentativas na busca de soluções para este problema, todavia, até o momento, não foram encontradas soluções satisfatórias (CHEN et al., 2013), apenas de caráter a aliviar certos aspectos do problema, como por exemplo, o projeto e design diferente de partes do sistema de irrigação (BRALTS et al., 1981; BRALTS et al., 1982) e entendimento de fatores que influenciam a obstrução, como a dimensão do emissor (CHIGERWE et al., 2004) e posição na linha lateral (RAVINA et al., 1997).

O processo da obstrução está ligado com os seguintes fatores: filtração inadequada ou deficiente, falta de tratamento químico da água (BUCKS; NAKAYAMA; GILBERT, 1979), ambos ligados com a qualidade da água de irrigação, ou ainda baixa frequência de flushing (LAMM, 2007) assim como a falta de monitoramento do comportamento hidráulico do sistema (CAMARGO et al., 2013). Como consequência desse entupimento, seja parcial ou total, a vazão esperada para as saídas dos emissores se alteram não fornecendo a quantidade de água desejada para as plantas, de maneira a não deixar o aproveitamento máximo do sistema e economia de água (LIU, 2009). Como consequência disso, o crescimento da cultura pode ser desuniforme, com diferenças nas fases de maturação e produção (BHATNAGAR, 2002).

A obstrução pode ser de natureza física, química ou biológica, características que são também consideradas como indicativos de qualidade da água (GIRÃO et al., 2007) mas comumente os fatores atuam simultaneamente em campo.

A obstrução por natureza biológica se resume a ação de microorganismos tais como algas, fungos e bactérias que, devido ao seu tamanho reduzido, passam pelo sistema de filtragem, adentram o sistema de irrigação e ali se desenvolvem formando colônias. Algumas bactérias se utilizam de ferro ou de sulfeto de hidrogênio dissolvido na água em seu metabolismo, originando biofilmes e mucilagem, que agem como agentes adesivos para partículas, facilitando a acumulação de argila, algas e outras partículas de tamanho reduzido, promovendo uma obstrução gradual dos emissores (ADIN; SACKS, 1991).

O método mais frequentemente adotado para contornar esse tipo de problema, tanto na prevenção quanto na remediação de emissores obstruídos, é a cloração da água, que faz o controle da população de microorganismos (NAKAYAMA; BUCKS, 1991; TEIXEIRA et al., 2008), podendo ser realizada tanto na forma de hipoclorito de sódio ou de gás cloro borbulhado. Todavia, é observado que resultados podem variar de acordo com o modelo, quantidade de microorganismos, concentração de cloro na água e dimensões do emissor (RESENDE, 2000a; RESENDE, 2000b).

A obstrução de natureza química corresponde à precipitação de sais, formando crostas salinas que podem bloquear a passagem da água no interior do emissor. São diversos os fatores que propiciam essa precipitação, como por exemplo a concentração do sal e sua solubilidade. Porém o pH da água é indicado como o fator de maior relevância (LAMM, 2007), pois é um fator de influência maior na solubilidade do sal. Caso o pH da água utilizada na irrigação seja inferior a sete, grande parte do problema de precipitação de sais estarão evitados, tal qual a multiplicação de microorganismos (PINTO et al., 2011).

Sais como cloreto férrico e cloreto ferroso, assim como o óxido de ferro, são comuns em tubulações deste material, especialmente mais antigas. A presença desses sais, especialmente em conjunto com outros agentes de obstrução, intensifica esse processo (DE CARVALHO et al., 2016).

A obstrução de natureza física é causada por partículas sólidas, como a areia, foco deste trabalho, e será discutida com mais detalhes no tópico seguinte.

A ação dos agentes de obstrução acima mencionados é extremamente facilitada pelas dimensões e arranjo arquitetônico com que os labirintos são projetados, ou seja, pelas características geométricas dos emissores. Quando em condições de operações com água de baixa qualidade, as características geométricas do labirinto são relatadas como um dos fatores de maior impacto no processo de obstrução (TAYLOR et al. 1995). Além disso, a posição da saída do emissor (para cima, para baixo ou para os lados), também aparenta ter efeito sobre esse processo (RIBEIRO et al., 2012).

2.3. Obstrução por partículas sólidas

No processo de obstrução por partículas sólidas (natureza física), são considerados agentes: a areia, silte e argila, pedaços de plástico, como rebarbas de fabricação do sistema, materiais de origem orgânica, como fragmentos de plantas, insetos, resíduos animais e até mesmo alguns moluscos e peixes e resíduos microbiológicos, tais como algas, diatomáceas, etc (NAKAYAMA, 2007).

Esses materiais passam pelo orifício de entrada de cada emissor, bloqueiam a passagem de água no labirinto ou, até mesmo, bloqueiam diretamente essa entrada de água. As partículas podem obstruir o labirinto de duas maneiras, por entupimento total, que ocorre quando o tamanho de partícula é maior que a área de seção de área do labirinto, ou por assoreamento (obstrução lenta), quando partículas finas se depositam lentamente nas regiões aonde a velocidade da água é mais baixa (COMPAORÉ, 2006).

Esse processo é o principal entrave para se desenvolverem novas tecnologias de gotejo e fator relevante na determinação do êxito do sistema de irrigação por gotejamento (ZHU; CUI, 2005), além de problema bastante significativo para usuários dos sistemas, pois sua solução e prevenção requer um gasto intenso de recursos como tempo e recursos financeiros. Mesmo a presença de filtros, principal estratégia para evitar a obstrução por partículas sólidas (ADIN, 1989), não necessariamente garante que partículas em suspensão não estarão presentes no sistema, pois essa filtração pode ser insuficiente ou inadequada (LAMM, 2007), prejudicando o sistema. Além disso, algumas partículas de origem biológica podem sofrer algum tipo de deformação ou rompimento, e conseguir passar pela malha (PUIG-BARGUÉS et al, 2005). Para a filtragem de silte e areia fina, por exemplo, é necessário se utilizar hidrociclones e para a remoção de argila, se realiza a decantação em tanque de tratamento químico.

As partículas grandes de areia (diâmetro $> 500 \mu\text{m}$, fração conhecida como “areia grossa”) geralmente não participam de processos de obstrução, pois todos os modelos de filtro possuem uma boa eficiência em as reterem (PITTS, 1985). As argilas suspensas não causam problemas de obstrução a não ser que comecem a flocular (CHEN et al., 2013). Em determinadas condições físico-químicas, após a passagem pelo sistema de filtragem (THILL et al., 2001). Tipos diferentes de minerais de argila podem apresentar influências distintas no processo de obstrução (OLIVEIRA, 2017), dependendo da sua natureza e capacidade de interagir com outras partículas suspensas na água. A quantidade de argilas suspensas pode ser associada com a turbidez da água a ser bombeada.

Em experimentos realizados com diferentes filtros (areia, disco, tela, combinado de disco e tela) visando a redução de turbidez e de sólidos totais suspensos, alguns autores demonstraram que o filtro de areia possui uma eficiência superior aos demais tipos de filtro (DURAN-ROS et al., 2009). Também foi demonstrado em outros experimentos que o filtro de areia possui eficiência satisfatória como tratamento terciário de águas de reuso, fonte alternativa de água, deixando-a em condições aptas à irrigação (HAMODA, 2004).

A entrada de partículas sólidas no sistema geralmente se dá durante a montagem do sistema, retirada de peças para alguma eventual manutenção, sucção da água com partículas em suspensão ou através dos próprios gotejadores, ao se desligar o sistema, devido à pressão negativa instantânea ali criada (TAYLOR et al., 1995).

Quando dentro do sistema de irrigação, devido às características de escoamento dentro dos emissores, especificamente nos labirintos, as partículas tendem a se depositar nos vórtices e zonas de estagnação. Os vórtices são regiões responsáveis por dissipar a energia hidráulica (QINGSONG et al., 2006), de maneira a ajustar as características do fluxo de água à vazão desejada na saída do emissor. Nessas regiões, a velocidade de escoamento é baixa, variando de 0 a $1,2 \text{ m s}^{-1}$.

No labirinto do emissor, existem dois regimes principais de escoamento do fluxo, sendo elas diferenciadas de acordo com o critério de velocidade. A primeira região são os vórtices, descritos no parágrafo anterior, a segunda região é a região do fluxo principal, aonde as velocidades são maiores, na ordem de $1,8 \text{ m s}^{-1}$ a $3,0 \text{ m s}^{-1}$ (AL-MUHAMMAD, TOMAS, ANSELMET, 2016). Alguns modelos de emissores alternativos, vem sendo estudados, com o auxílio de CFD (Computational Fluid Dynamics), com o intuito de se obter peças menos sensíveis ao processo de obstrução. Uma das estratégias é justamente se alterar o labirinto de acordo com as características dos vórtices para se evitar a deposição de partículas (ALI, 2013). Mudanças como o formato e dimensões do labirinto, por exemplo, de trapezoidal para retangular ou zig-zag, alteram significativamente as características dos vórtices formados, aumentando ou diminuindo a probabilidade de deposição da partícula, conforme o caso (WEI et al., 2012).

Apenas partículas suspensas podem causar obstrução, mas frequentemente, como mencionado anteriormente, há a atuação de fatores químicos e biológicos juntos, como subprodutos lodosos de metabolismo bacteriano, que aderem nas partículas, fazendo um aglomerado de diâmetro maior e aumentando assim a obstrução. Mesmo com a presença desses outros fatores, a obstrução por partículas sólidas suspensas aparece como a mais frequente (LI et al., 2012).

Foi proposta uma classificação quanto ao risco de obstrução por partículas sólidas presentes na água, da seguinte maneira: 1 – sem risco de obstrução, quando a concentração de partículas sólidas for menor que 50 mg L^{-1} ; 2 – risco moderado de obstrução, quando a concentração de partículas é maior que 50 mg L^{-1} e menor ou igual a 100 mg L^{-1} ; e 3 – alto risco de obstrução, quando a concentração de partículas é maior que 100 mg L^{-1} (BUCKS, NAKAYAMA, GILBERT, 1979).

Em ensaios mais recentes, uma nova classificação desse risco foi proposta por obstrução relativa à concentração de partículas sólidas presentes na água, sendo: 1 – concentrações menores que 200 mg L^{-1} não apresentam risco de obstrução, 2 – concentrações entre 200 e 400 mg L^{-1} apresentam risco moderado de obstrução e, finalmente, 3 – concentrações superiores a 400 mg L^{-1} apresentam alto risco de obstrução (CAPRA, SCICOLONE, 1998). Vale ressaltar que as duas classificações mencionadas consideram o tamanho das partículas presentes em água na sua classificação.

Mesmo assim, é muito difícil se associar o risco de obstrução à qualidade da água utilizada para a irrigação, já que os agentes da obstrução, de natureza física, química ou biológica, atuam praticamente sempre em conjunto quando no campo.

Algumas práticas por parte do usuário desse sistema podem ser feitas para amenizar o nível de obstrução de gotejadores, tais como a manutenção do escoamento turbulento, a fim de evitar a deposição de partículas, além da avaliação periódica do sistema (KARMELI, 1975) e realização de práticas como o *flushing*, que consiste em abrir o fim das linhas laterais do sistema e liberar a passagem do fluxo de água, o que tende a remover algumas partículas sólidas ali depositadas.

Alguns trabalhos relacionados a propriedades do *flushing* têm sido realizados, tais como o estudo de velocidade (PUIG–BARGUÉS et al., 2013), duração e frequência dessa prática (PUIG–BARGUÉS et al., 2010) e sua influência nas características do sistema, demonstrando condições mais apropriadas do uso dessa técnica.

2.4. Repetitividade e reprodutibilidade de ensaios

A repetitividade é um conceito relacionado à variabilidade própria de cada instrumento de medição (mensurando). Já a reprodutibilidade é a capacidade de um instrumento de medição de apresentar o mesmo grau de concordância de medidas realizadas em diferentes condições de manejo (MONTGOMERY, 2016).

Na repetitividade, as condições em que as medições são realizadas devem permanecer as mesmas, sendo elas o mesmo procedimento de observação, mesmo operador do instrumento, mesmo local e repetições realizadas com um curto intervalo de tempo. Na reprodutibilidade, medições de um mesmo mensurando são realizadas em condições diferentes, podendo essas serem o método, o observador, o padrão de referência, local, tempo e condições de uso (PEDOTT, 2012). Tanto repetitividade quanto reprodutibilidade podem ser avaliadas de acordo com a dispersão de seus resultados obtidos (INMETRO, 2010) sendo que refletem a qualidade do sistema de medição utilizada.

A validação de um método é um procedimento que fornece provas, através de dados, que a metodologia testada seja confiável, reprodutível, e que suas variações se concentrem sobre um intervalo específico de valores. A variação dos valores obtidos é praticamente intrínseca a erros e a fatores não–conhecidos que ocorrem durante as medições.

No caso de ensaios de susceptibilidade de gotejadores ao processo de obstrução, não existe ainda uma norma técnica e metodologia específica recomendada para tal, apenas propostas por estudos anteriormente publicados. A variação de resultados obtidos, nesse caso, pode dar–se a um, ou combinação de dois ou mais, dos seguintes fatores: variações na concentração de partículas sólidas no reservatório ou na tubulação, variações nas dimensões internas de peças como tubulação e gotejadores de um mesmo modelo, devido à possíveis erros de fabricação, obstruções decorrentes de partículas sólidas exógenas que, por ventura, adentraram no sistema de testes (LAVANHOLI, 2016).

Como é difícil isolar e quantificar a ação de cada agente interferente, não se tendo conhecimento de seus mecanismos de ação nas condições de teste, os resultados obtidos podem ser discrepantes entre si e não apresentar coerência.

Ainda há o fator limitante da temporalidade e viabilidade econômica de ensaios, pois estes podem durar de semanas até meses, mesmo sendo trabalhados por diversas horas durante o mesmo dia. A necessidade de se reproduzir em laboratório uma certa quantidade de tempo de trabalho real do equipamento em campo torna os ensaios bastante extensos e o custo para se repetir um determinado número de ensaios pode ser alto levando–se em conta todos os materiais e equipamentos necessários para tal.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Gotejadores

Foram utilizados quatro modelos de gotejadores: Drip-Tech, de vazões 1,2 e 1,6 L h⁻¹, e Taldrip, de vazões 0,6 e 1,7 L h⁻¹. Os gotejadores são do tipo pastilha, não auto-compensantes e integrados a tubos de polietileno com diâmetro nominal de 17 mm. Para o estudo de cada modelo foram utilizadas duas linhas de 5,5 m de comprimento, com gotejadores espaçados de 0,30 m. Cada linha possuía 17 gotejadores, dos quais 13 foram avaliados e os outros 4 foram considerados bordaduras.

O modelo Drip-Tech de 1,6 L h⁻¹ é geometricamente similar ao modelo Drip-Tech de 1,2 L h⁻¹, possuindo apenas dimensão de labirinto maior na profundidade do canal para fornecer maior vazão. As dimensões desses gotejadores são mostradas na Figura 1 e Tabela 1:

Figura 1. Dimensões dos modelos de gotejador usados no experimento: a) Taldrip 0,6 L h⁻¹; b) Taldrip 1,7 L h⁻¹; c) Drip-Tech 1,6 L h⁻¹ e Drip-Tech 1,2 L h⁻¹; d) Dimensões dos labirintos dos emissores Taldrip 0,6 L h⁻¹; e) Taldrip 1,7 L h⁻¹ e f) Drip-Tech 1,2 L h⁻¹; Drip-Tech 1,6 L h⁻¹ (LAVANHOLI, 2016).

Tabela 1. Características técnicas dos emissores selecionados

Fabricante	Modelo	Vazão nominal (L h ⁻¹)	Comprimento do emissor (mm)	Largura do emissor (mm)	Espessura do emissor (mm)	Profundidade do canal do labirinto (mm)	Pressão de serviço (mca)
NaanDanJain	Taldrip	1,7	32,6	6	2,4	0,71	14
NaanDanJain	Taldrip	0,6	32,6	6	2,4	0,42	14
Drip-Plan	Drip-Tech	1,6	30,1	8,4	3,1	0,64	14
Drip-Plan	Drip-Tech	1,2	30,1	8,4	3,1	0,54	14

3.2. Bancada e rotina de ensaios

Os estudos foram realizados no Laboratório de Ensaios de Material de Irrigação (LEMI/ESALQ/USP). Utilizou-se uma bancada de estrutura metálica (Figura 2) que consiste em uma calha de escoamento de água sobre a qual foram dispostas oito linhas de gotejadores (Figura 3A e Figura 4). O comprimento total da bancada é de 6,5 m e a altura total de 2 m. Os gotejadores ficavam a uma distância máxima de 50 cm dos coletores para evitar que gotículas se espalhassem para fora do recipiente durante os ensaios.

A água descarregada pelos gotejadores era recolhida pela calha e conduzida para um reservatório de 200 L que, para evitar a sedimentação das partículas, possuía um agitador em formato de hélice, com 18 cm de diâmetro, movido por um motor de 0,25 CV. No reservatório estava acoplada a motobomba responsável por pressurizar a água e alimentar o sistema. Antes de entrar nas linhas gotejadoras a água passava por um filtro de malha 35 mesh (abertura de 0,5 mm). A água era distribuída para as linhas através de uma linha de derivação com bifurcações simétricas (Figura 4), para evitar tendências na distribuição de partículas, tendo sido previamente testado para garantir a homogeneidade de concentração de partículas na água em cada saída.

Figura 2. Representação da bancada e seus componentes (LAVANHOLI, 2016).

Figura 3. (A) Bancada de ensaios; (B) Motobomba com rotor e carcaça em inox, utilizada no experimento; (C) Calha de coleta da água com areia; (D) Coletores utilizados para determinação de vazão

Figura 4. Linha de derivação com bifurcações simétricas usada para evitar tendências de fluxos entre as linhas laterais (PERBONI, 2016)

No final de cada linha gotejadora instalou-se um bocal que permite o ajuste da velocidade de escoamento em, aproximadamente, 1 m s^{-1} . Essa velocidade é recomendada pela equipe do laboratório francês, sendo justificada como correspondente a uma vazão que se encontra em uma faixa de velocidade comum observada em linhas laterais que operam em campo, sendo ainda capaz de manter as partículas sólidas em suspensão, garantindo que as mesmas não sedimentem no interior do tubo gotejador.

A pressão de ensaio foi mantida em 100 kPa e foram realizadas medições de vazão ao final de cada ciclo de 8 horas de ensaio.

3.3. Preparação da areia

Os ensaios foram conduzidos utilizando partículas de areia originadas de solo natural pelo fato das partículas já estarem intemperizadas e com as arestas arredondadas. O solo coletado em campo passou por um processo de preparação seguindo a norma ISO 11277 (2009) que estabelece um procedimento de preparação para análise granulométrica. A metodologia consiste em processos de destruição da matéria orgânica e dispersão da fração argila do solo. O solo utilizado para a preparação da areia foi coletado na fazenda sertãozinho da ESALQ-USP (22° 43' 31" S; 47° 38' 57" W; Datum WGS84), no município de Piracicaba – SP. Esse solo foi escolhido por possuir uma textura

arenosa, o que facilitou a obtenção de uma grande quantidade do material nas frações granulométricas utilizadas com poucos quilos de solo coletado. Coletou-se somente material do horizonte mais superficial, no caso, horizonte A.

A porcentagem em massa das frações granulométricas do solo assim como os limites de tamanho para delimitar cada faixa estão mostrados nas Tabelas 2 e 3.

Tabela 2. Limites de tamanho, em μm , de classe de partícula, usados nesse trabalho

Areia		Silte		Argila	
Superior	Inferior	Superior	Inferior	Superior	Inferior
2000	63	63	2	2	–

Tabela 3. Porcentagem em massa de cada fração granulométrica presente no solo coletado

Porcentagem em massa		
Argila	Silte	Areia
17	6,1	76,9

Os tratamentos que o solo passou foram: após a coleta, o solo foi seco ao ar, destorroado e passado por uma peneira de abertura 2 mm. Tomou-se o material que passou por essa peneira e colocou em béqueres amostras de solo com massa de 20 g. O próximo passo consistiu em adicionar a cada béquer 30 mL de água para o umedecimento do solo e 30 mL de peróxido de hidrogênio (H_2O_2) a 30%, para destruir a matéria orgânica presente.

O conteúdo dos béqueres foi agitado com bastão de vidro e então cobriu-se o béquer com um vidro, deixando a reação ocorrer por 15 horas. Depois desse período, os béqueres foram colocados em uma placa aquecedora, onde a temperatura se manteve entre 105 °C e 110 °C, permanecendo até que a borbulha devido à reação de decomposição do peróxido tenha cessado.

A etapa seguinte consistiu em adicionar a cada amostra um volume de 25 mL de CaCl_2 a 1 mol L^{-1} e água até que o volume completasse 250mL e, então, foram deixadas em repouso por uma hora e meia. Essa etapa teve a finalidade de flocular os minerais. Em seguida, a eliminação do restante da matéria orgânica foi realizada através de sifonação do sobrenadante. O procedimento de adição de água foi repetido até que a condutividade elétrica do sobrenadante (CE) fosse inferior a 0,4 dS m^{-1} , sendo que a água adicionada era deionizada e o volume adicionado até atingir o volume inicial.

O próximo passo consistiu na remoção de sais solúveis para evitar que interferissem na fase de dispersão. Para isso, o solo foi colocado em um recipiente com fração de volume solo:água de 1:4, depois colocado em um agitador horizontal (*shaker*) durante um intervalo de 1 h, e depois deixado em repouso até a sedimentação das partículas. Após a sedimentação, foi determinada a CE da solução sobrenadante e, quando ela era superior ao exigido pela norma (0,4 dS m^{-1}), o sobrenadante foi eliminado, adicionando-se novamente água deionizada e repetindo-se o processo de agitação e posterior sedimentação até se alcançar o valor exigido pela norma.

Quando esse valor era atingido, começava-se a fase de dispersão. O agente dispersante indicado pela norma era uma solução contendo 33 g de hexametáfosfato de sódio ($\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{40}$) e 7 g de carbonato de sódio (Na_2CO_3) dissolvidos em 1 L de água destilada. No entanto, a norma permite a utilização de outros reagentes, sendo que para solos brasileiros, o IAC (Instituto Agrônomo de Campinas) (CAMARGO, 2009), indica a utilização de uma solução com 20 g hidróxido de sódio (NaOH) e 50 g de $\text{Na}_6\text{P}_6\text{O}_{40}$ dissolvidos em 5 L de água destilada. Foram então adicionados

à cada recipiente com solo 100 mL de agente dispersante e depois se colocou o recipiente novamente no agitador por um período de 18h.

Depois da agitação, o conteúdo foi lavado com um jato de água destilada, na peneira de malha 230 mesh, correspondente à abertura de 0,063 mm, para se obter somente partículas de areia. Após lavado, o material retido na peneira foi seco em estufa a 105°C e posteriormente separado em diversas faixas granulométricas previamente estabelecidas. Para obter as faixas granulométricas a serem utilizadas nos ensaios mencionados nesse trabalho, foram utilizadas as peneiras de 63; 125; 212 e 500 μm . Na Figura 5 são indicadas as porcentagens em massa para as faixas de 63–125 μm (mais fina), 125–212 μm (média) e 212–500 μm (mais grossa) e estão caracterizadas as sub-faixas granulométricas dentro de cada faixa. A faixa de 63–125 μm foi caracterizada nas sub-faixas de 63–90, 90–106 e 106–125 μm , a faixa de 125–212 μm , nas sub-faixas de 125–180 e 180–212 μm e a faixa de 212–500 μm , nas sub-faixas de 212–250, 250–300, 300–425 e 425–500 μm .

Em cada repetição, cada tratamento (combinação de concentração e granulometria) teve 40 horas de ensaio, ou 5 dias com operação diária de 8h. Como eram 4 concentrações (125 mg L⁻¹; 250 mg L⁻¹; 275 mg L⁻¹ e 500 mg L⁻¹) e 3 granulometrias (0,063 mm – 0,125 mm; 0,125 mm – 212 mm e 212 mm – 500 mm), um total de 12 combinações foram testadas, para cada repetição (Tabela 4) e o tempo de ensaio para cada repetição foi de 12 semanas. Sendo efetuadas duas repetições, o tempo de experimento foi de 24 semanas, ou 6 meses.

Figura 5. (A) Porcentagem em massa (%) das faixas granulométricas usadas no trabalho e caracterização das respectivas sub-faixas granulométricas, (B) 63–125 μm , (C) 125–212 μm e (D) 212–500 μm

Tabela 4. Combinações de granulometria e concentração de partículas de areia

Granulometria	Concentração			
	C1	C2	C3	C4
G1	63–125 μm 125 mg L ⁻¹	63–125 μm 250 mg L ⁻¹	63–125 μm 375 mg L ⁻¹	63–125 μm 500 mg L ⁻¹
G2	125–212 μm 125 mg L ⁻¹	125–212 μm 250 mg L ⁻¹	125–212 μm 375 mg L ⁻¹	125–212 μm 500 mg L ⁻¹
G3	212–500 μm 125 mg L ⁻¹	212–500 μm 250 mg L ⁻¹	212–500 μm 375 mg L ⁻¹	212–500 μm 500 mg L ⁻¹

3.4. Controle do ensaio e coleta de dados

Os dados obtidos a cada dia foram o volume coletado de 26 emissores de cada modelo de gotejador, num período de 30 min (a vazão era determinada com coletor a partir de 7 h 30 min de ensaio, terminando esse processo no completar das 8 h diárias de ensaio), das duas linhas de cada modelo de gotejador, sendo 13 emissores por linha, ou seja, um total de 104 emissores avaliados por dia. Foi realizada também medição de pH e temperatura da água, diariamente, no início e no fim do ensaio. O pH foi mantido em torno de 6,5 e, caso estivesse fora dessa faixa, foi controlado com ácido clorídrico ou hidróxido de sódio. Esse controle foi feito para evitar a precipitação de sais e influência do fator químico na obstrução dos emissores. Para evitar a formação de biofilme devido à ação de micro-organismos, foi feita diariamente a cloração da água com 6 mL na concentração de cloro livre de 2 ppm, utilizando como fonte de cloro livre o hipoclorito de sódio (NaClO).

O volume total de solução no reservatório era de 200 L, todavia, ao fim de cada dia, como havia evaporação da água, procedia-se a reposição desse volume com água deionizada antes do início do ensaio do dia seguinte. Esse processo fazia que a condutividade elétrica da água no tanque não aumentasse. Além de preparar uma nova solução para o reservatório a cada nova semana de testes, para testar outra combinação de granulometria e concentração, os tubos também foram trocados semanalmente, não alterando o modelo de emissor. Essa troca é justificada para evitar um possível efeito residual entre ensaios consecutivos, ou seja, para evitar a influência de um ensaio anterior em um ensaio posterior. Com esse mesmo objetivo, a cada semana a bancada era lavada com bucha e detergente, além de quatro ou cinco retrolavagens, cada vez com água nova, para retirar as possíveis partículas presas na bomba ou na tubulação.

A água utilizada foi previamente deionizada principalmente com a finalidade de padronizar as características da água utilizada no decorrer de todos os ensaios. Adicionalmente, também havia a intenção de reduzir a quantidade de íons presentes na água, que podem precipitar na forma de sais e interferir no processo de obstrução. Além disso, os íons podem servir como nutrientes para microorganismos que potencialmente poderiam se desenvolver no tubo gotejador. Em seguida adicionava-se a areia, de granulometria e massa correspondentes ao tratamento a ser ensaiado na semana. Como o volume do reservatório era 200 L, e se desejava obter concentrações de areia de 125; 250; 375 e 500 mg L⁻¹, eram adicionados, respectivamente para cada caso, 25; 50; 75; e 100 g de areia, na faixa granulométrica correspondente.

Para determinar a vazão dos gotejadores, fez-se a pesagem do recipiente com a água recolhida por 30 min. A massa de água foi obtida da seguinte forma (Eq. 1):

$$m_a = m_t - m_r \quad (1)$$

em que:

m_a : massa de água, g;

m_t : massa total, seja o recipiente coletor com a água coletada, g;

m_r : massa do recipiente coletor, g;

A vazão do gotejador foi calculada com base na massa de água coletada num dado intervalo de tempo e leva em conta a massa específica da água (ρ) (Eq. 2).

$$q = \frac{m_a}{\rho t} \cdot 3,6 \cdot 10^7 \quad (2)$$

em que:

q : vazão do gotejador, L h⁻¹;

t : tempo do ensaio, h;

ρ : massa específica da água, kg m⁻³;

A massa específica da água foi estimada em função da temperatura da água utilizando a Eq. 3 (TANAKA et al., 2001).

$$\rho = 999,974950 \left[1 - \frac{(T - 3,983035)^2 (T + 301,797)}{522528,9 (T + 69,34881)} \right] \quad (3)$$

em que, T é a temperatura da água, °C.

A temperatura da água usada para estimar a massa específica foi medida no momento da coleta da água dos gotejadores.

A sensibilidade dos emissores à obstrução foi avaliada por meio da proporção de redução da vazão dos emissores durante o tempo de ensaio. Como critério, foi considerado obstruído o emissor que apresentou vazão menor ou igual a 75% em relação à vazão determinada no início do ensaio (Eq. 4), o que corresponde a um Grau de Obstrução maior ou igual a 25%. Um lote de gotejadores foi considerado obstruído quando 25% dos gotejadores do lote foram classificados como obstruídos (Eq. 5).

$$q_a \leq 0,75 q_0 \quad (4)$$

$$N_o \geq 0,25 N_T \quad (5)$$

em que:

q_a é a vazão atual do gotejador, L h⁻¹;

q_0 é a vazão do gotejador determinada no início do ensaio, com água limpa, L h⁻¹;

N_o é o número de gotejadores obstruídos;

N_T é o número total de gotejadores que compõem a amostra;

O Gra de Obstrução é definido como (Eq. 6):

$$GO = 1 - \frac{q_a}{q_0} \quad (6)$$

A vazão inicial dos emissores foi determinada com água limpa no início de cada semana de testes, após o processo de limpeza da bancada, instalação de tubos-gotejadores, enchimento do reservatório com água deionizada e precedente à adição de ácido ou base para controle do pH, hipoclorito para controle microbiano e da areia no reservatório.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Resultados gerais dos ensaios de obstrução

Realizaram-se duas repetições de experimentos nas condições de ensaio listadas na Tabela 4, sendo que quatro modelos comerciais de gotejadores foram avaliados simultaneamente. As Figuras 9 a 20 agrupam os resultados por tratamentos que combinam concentração e granulometria. Os seguintes resultados são apresentados: (A) número de emissores obstruídos em cada dia de ensaio (Grau de Obstrução maior ou igual a 25%); (B) temperatura da água no início e fim de cada dia de ensaio; (C) pH da água no início e fim de cada dia de ensaio; (D) condutividade elétrica da água no início e fim de cada dia de ensaio. A linha pontilhada vermelha nos gráficos indica o número de emissores obstruídos que caracterizariam a linha ensaiada como obstruída (Grau de Obstrução da linha 25% ou maior), ou seja, 7 emissores.

Figura 9. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 1: 63–125 μm e Concentração 1: 125 mg L^{-1} (C1G1): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 10. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 1: 63–125 μm e Concentração 2: 250 mg L^{-1} (C2G1): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 11. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 1: 63–125 μm e Concentração 3: 375 mg L^{-1} (C3G1): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 12. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 1: 63–125 μm e Concentração 4: 500 mg L^{-1} (C4G1): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 13. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 2: 125–212 μm e Concentração 1: 125 mg L^{-1} (C1G2): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 14. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 2: 125–212 µm e Concentração 2: 250 mg L⁻¹ (C2G2): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 15. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 2: 125–212 μm e Concentração 3: 375 mg L^{-1} (C3G2): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 16. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 2: 125–212 μm e Concentração 4: 500 mg L^{-1} (C4G2): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 17. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 3: 212–500 μm e Concentração 1: 125 mg L^{-1} (C1G3): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 18. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 3: 212–500 µm e Concentração 2: 250 mg L⁻¹ (C2G3): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 19. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 3: 212–500 μm e Concentração 3: 375 mg L^{-1} (C3G3): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

Figura 20. Resultados das duas repetições do ensaio realizado na Granulometria 3: 212–500 µm e Concentração 4: 500 mg L⁻¹ (C4G3): (A) Número de emissores obstruídos (linha horizontal vermelha indica o número limite de emissores obstruídos que caracteriza obstrução do lote avaliado); (B) Temperatura da água; (C) pH da água; (D) Condutividade elétrica da água

No Anexo A são mostrados os registros do número de emissores obstruídos em cada condição de ensaio, assim como resultados de pH, temperatura e condutividade elétrica da água, medidos no início e fim de cada dia de ensaio.

4.2. Temperatura da água

Ao longo de todo o experimento, a temperatura mínima da água foi de 18,7°C e a máxima de 31,4°C (Figuras 9B a 20B). A temperatura da água foi somente monitorada, não havendo mecanismo de controle. As flutuações na temperatura da água são essencialmente explicadas pelas variações de temperatura diária. O experimento era iniciado, geralmente, entre 7h30min e 8h30min e finalizado após 8h de operação. O experimento foi conduzido por mais de 6 meses, em diferentes estações do ano no município de Piracicaba – SP (22° 43' 31" S; 47° 38' 57" O, Datum WGS84), o que acarretou diferenças expressivas nas temperaturas iniciais e finais, ainda que essas medições tenham sido feitas praticamente nos mesmos horários. A temperatura da água registrada no final de cada dia de ensaio foi usada para a determinação da massa específica da água (Eq. 3) e cálculo da vazão coletada (Eq. 2).

O efeito da temperatura da água sobre o experimento se resume a evaporação da água da bancada e pequenas alterações na massa específica da água. A evaporação da água afetava a condutividade elétrica da mistura, devido ao aumento de concentração de íons na mistura. O volume máximo evaporado de água do início ao fim do experimento foi em torno de 10 L, sempre repostos ao fim do dia.

A Figura 21 apresenta a massa específica plotada para todos os dias de ensaio e serve para demonstrar que embora a temperatura da água tenha variado significativamente, a massa específica apresentou variação máxima de aproximadamente 0,2%. Portanto, a implementação de um sistema para controle da temperatura provavelmente não seria algo crítico analisando-se apenas o impacto da temperatura da água na massa específica e na vazão dos gotejadores.

Figura 21. Massa específica da água ao longo de todo o experimento

4.3. pH da água

Desejava-se manter o pH da água próximo a 6,5, sendo esse controle realizado uma vez por dia e no início do ensaio. Conforme ilustrado nas Figuras 9C a 20C, houve dificuldades no ajuste manual do pH da mistura ou falhas nas medições de pH, sendo que se observam condições de pH desde 4,0 até 8,2. Portanto, pode-se supor que o controle de pH ao longo dos experimentos não eficaz e houve variabilidade considerável nesse parâmetro.

Como rotina, efetuou-se correção do pH no início do ensaio, todavia ao fim do dia o valor medido diferia do inicial. Normalmente o pH no final era superior ao pH no início do dia, possivelmente devido a dois fatores: (a) liberação de hidroxilas pela areia: o solo obtido através do tratamento descrito nos materiais e métodos foi submetido à ação de bases fortes no processo e, mesmo com várias lavagens, algumas hidroxilas podem ter ficado retidas na superfície da areia sendo liberadas posteriormente na água, elevando o pH; e (b) alteração do pH devido à adição de hipoclorito: o hipoclorito adicionado para controle de micro-organismos influencia o pH no decorrer do tempo do experimento, elevando o pH.

4.4. Condutividade elétrica da água

A condutividade elétrica da água frequentemente aumentou do início para o final do experimento (Figuras 9D a 20D), sendo que isso provavelmente está relacionado: à evaporação da solução usada; ao acréscimo de ácido para o controle de pH; a adição de hipoclorito de sódio para evitar crescimento microbiano. Todavia, na maioria dos casos o valor máximo da condutividade elétrica sempre se manteve em valores de até $300 \mu\text{S cm}^{-1}$. Conforme ilustra na Figura 13D, nos dois primeiros dias do ensaio na condição C1G2, a condutividade elétrica apresentou valor excessivos. Tal fato deve-se a problema temporário no sistema de deionização da água. Nesses dois dias, água de maior condutividade elétrica (não deionizada) foi utilizada para repor a água no reservatório, fazendo com que os valores, nesses dias, ficassem em torno de $500 \mu\text{S cm}^{-1}$.

De modo geral, a condutividade elétrica na água no primeiro dia de ensaios em cada condição era em torno de $100 \mu\text{S cm}^{-1}$. Essa era a condutividade da água deionizada já misturada com o composto de partículas utilizado na respectiva condição de ensaio. A água obtida do deionizador sempre apresentou condutividade elétrica inferior a $10 \mu\text{S cm}^{-1}$. Para esse estudo, o uso de água deionizada teve como principal objetivo padronizar as condições iniciais de ensaio entre os tratamentos.

4.5. Obstrução dos emissores

Os modelos de gotejadores de vazão $1,2$; $1,6$ e $1,7 \text{ L h}^{-1}$ se mostraram resistentes à obstrução, pois não tiveram um grau de obstrução, ou seja, redução de vazão, maior ou igual a 25% da vazão de referência testada com água limpa, causada por partículas de areia, nas condições testadas nesse experimento, independente da combinação de granulometria e concentração (Figuras 9A a 20A). Em cada tratamento, avaliaram-se 26 emissores de cada modelo de emissor. Nota-se que o emissor de vazão $1,2 \text{ L h}^{-1}$, não teve nenhum gotejador obstruído, sendo um emissor bastante resistente a operação sob condição de risco de obstrução. O modelo de vazão $1,6 \text{ L h}^{-1}$ teve apenas um emissor obstruído e o modelo de vazão $1,7 \text{ L h}^{-1}$ apresentou 6 emissores obstruídos durante todo o experimento.

A Figura 22 mostra-se emissores de vazão $1,7 \text{ L h}^{-1}$, da repetição dois, concentração 125 mg L^{-1} , obstruído por partículas de areia de faixa granulométrica $125 - 212 \mu\text{m}$ (Figura 22A), e um emissor de mesmo modelo, limpo, sem deposição de partículas de areia (Figura 22B). Essas imagens foram obtidas pela remoção dos gotejadores do tubo e secção destes ao meio, e captura da imagem através de lupa com câmera fotográfica. Ressalta-se aqui a grande dificuldade de se obter a imagem de um emissor com partículas depositadas, pois, em sua manipulação (corte e posicionamento em um suporte para dar foco à lupa e câmera), as partículas no interior se desarranjavam e, no corte, pequenos pedaços de fita preta contaminavam a imagem.

Figura 22. Emissores modelo 1,7 L h⁻¹ obstruído por partículas de areia de faixa granulométrica 125 – 212 µm na concentração 125 mg L⁻¹ (A), comparado com emissor limpo (B)

Utilizando faixas granulométricas em intervalos similares (53–105; 105–250; 250–500 µm) de areia não-intemperizada e um modelo de gotejador do tipo cilíndrico, de marca NaanDanJain e vazão nominal 2 L h⁻¹, Perboni (2016) observou que este modelo não foi sensível ao processo de obstrução na granulometria mais fina, todavia o modelo apresentou sensibilidade à obstrução nas faixas granulométricas maiores. Esses resultados não corroboram com os observados nesse trabalho, já que todos os modelos de vazão igual ou superior a 1,2 L h⁻¹ não se mostraram sensíveis a obstrução. Essas diferenças provavelmente se explicam devido às diferenças nos materiais e metodologias utilizadas neste trabalho, incluindo o fato da areia não ser intemperizada, tendo um formato geométrico favorável ao processo de obstrução. Há ainda a possibilidade de que agentes contaminantes relacionados a partículas metálicas do rotor da bomba ou partículas de tinta da bancada de ensaios tenham exercido influência nos resultados obtidos por Perboni (2016). Isso justificaria a maior severidade da obstrução nos resultados relatados pelo referido autor.

Os gotejadores com vazão de 0,6 L h⁻¹ apresentaram comportamento diferente dos demais em relação à susceptibilidade por obstrução causada por partículas de areia, mostrando alta suscetibilidade nos casos testados (Figuras 9A a 20A). Em experimento usando os mesmos modelos de gotejadores, mesma bancada e condições experimentais similares, com faixas granulométricas de partículas diferentes, incluindo partículas de argila e silte, em concentrações similares, Lavanholi (2016) encontrou resultados semelhantes para o modelo de gotejador de vazão 0,6 L h⁻¹, com a rápida obstrução dos gotejadores em comparação aos outros modelos, e Faria (2013), em experimento com modelos diferentes de gotejador, observou também, resultados de maior obstrução para o modelo de menor vazão.

Observa-se um comportamento semelhante nas faixas granulométricas intermediária e superior, estando os gotejadores obstruídos completamente em quase 100% dos casos. Nesses casos, o processo de obstrução ocorria de forma semelhante, independente da concentração de partículas na água. Aparentemente, para esse modelo de gotejador, as pequenas dimensões internas, associadas às características geométricas do emissor e tamanho das partículas testadas foram fatores de influência suficiente para desencadear o processo de obstrução em todos os casos envolvendo as faixas granulométricas intermediária e superior. Li et al. (2006) estudando a influência de características geométricas dos labirintos dos emissores obtiveram resultados que indicam que características como o espaçamento, ângulação e altura dos dentes possuem grande influência em propriedades “anti-obstrução” de gotejadores. Sendo assim, não somente as dimensões internas do canal mas também as características dos dentes que compõem o labirinto são importantes no processo de obstrução.

Observações em relação ao tamanho de partículas foram feitas por Adin e Sacks (1991), que salientam ser o processo de obstrução mais influenciado pelo tamanho da partícula do que pela quantidade de partículas na água. Os autores fizeram um experimento em que o sistema foi operado com partículas de tamanhos diferentes, dispersas na água e, no caso de partículas de 100–300 μm , foi observada redução na vazão dos emissores, o que não foi observado no caso de partículas de tamanho menor que 100 μm , independentemente de sua concentração.

Como neste trabalho a menor faixa granulométrica (63–125 μm) continha partículas tanto menores e maiores que 100 μm , o fenômeno da redução de vazão pôde ser observado, possivelmente por influência das partículas de tamanho 100–125 μm , todavia, nas condições experimentais aqui utilizadas, não é possível diferenciar o efeito de partículas das faixas granulométricas de 63–100 μm e 100–125 μm na obstrução dos gotejadores, não sendo possível dizer se somente as partículas de tamanho contido entre 100–125 μm participaram do processo.

Chen, Liu e Niu (2013), utilizando gotejadores com vazão de 3 L h⁻¹, com dimensões de labirinto maiores do que os utilizados nesta pesquisa, e partículas de diâmetro inferior a 100 μm (incluindo argila, silte e areia), observaram para a concentração de partículas de 500–1250 mg L⁻¹, mudanças de intensidade moderada na vazão e obstrução de alguns emissores, diferindo dos resultados obtidos por Adin e Sacks (1991) para essa faixa granulométrica. A obstrução tornou-se crítica nas condições de concentrações de partículas superiores a 1250 mg L⁻¹. Quando analisada a obstrução de acordo com o tamanho da partícula, os autores constataram redução do grau de obstrução com a redução do diâmetro das partículas, corroborando com os resultados dos trabalhos acima mencionados de Perboni (2016) e Adin e Sacks (1991).

Neste trabalho, foi observado para as partículas de menor tamanho (menor faixa granulométrica, 63–125 μm), um incremento menor no número de gotejadores obstruídos (progresso da obstrução) a cada dia (Figuras 9A, 10A, 11A e 12A), em comparação com as partículas de tamanho maior (Figuras de 13A a 20A). Ao se comparar somente os resultados obtidos após 40 h de ensaio para cada combinação de concentração vs. granulometria, é verificado também, um menor grau de obstrução dos gotejadores com as partículas de menores dimensões.

O progresso da obstrução dos gotejadores com o tempo foi grande para as faixas granulométricas 125–212 μm e 212–500 μm como se pode observar nas Figuras 16 e 17, respectivamente. Os gráficos mostram o aumento do número de gotejadores obstruídos a cada 8h de experimento. As (Figuras de 14A a 21A) mostram que, para as faixas granulométricas média e grande, ao fim de 16h de ensaio, no mínimo 65% dos emissores avaliados, ou seja 17 dos 26 gotejadores, do modelo de vazão 0,6 L h⁻¹ já estavam obstruídos e, no mínimo 84% (22 dos 26) ao final do terceiro dia.

Todavia, para os resultados obtidos na faixa granulométrica mais fina (Figura 9A), observa-se um comportamento diferente do esperado em relação à concentração. Nas concentrações maiores o número de emissores obstruídos foi menor do que para outras faixas granulométricas nas mesmas concentrações. Já na concentração mais baixa (125 mg L⁻¹) os resultados foram similares aos de outras faixas granulométricas (125–212 μm e 212–500 μm), diferindo no incremento do número e gotejadores obstruídos a cada dia, no caso, menor.

A Figura 23 mostra o emissor de vazão 0,6 L h⁻¹ obstruído por partículas de areia da faixa granulométrica de 63–125 μm , na concentração de 125 mg L⁻¹.

Figura 23. Emissores de modelo de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$ obstruídos, com areia da faixa granulométrica de $63\text{--}125 \mu\text{m}$, concentração de 125 mg L^{-1}

Em relação ao local do início da obstrução dentro do emissor, a Figura 24 mostra gotejadores de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$, submetidos a diferentes faixas granulométricas e concentrações, excluindo a faixa granulométrica mais fina. Essas imagens revelam que os labirintos foram obstruídos em duas posições do canal: (1) obstrução ao longo do labirinto; e (2) obstrução na entrada do labirinto. O local de deposição de partículas foi observado por Chen, Liu e Niu (2013), que classificaram em 3 posições a região de acúmulo de partículas: (1) entrada do labirinto; (2) o longo do labirinto e (3) no fim do labirinto. Os autores dizem que o fluxo de água, ao entrar no labirinto, é submetido a uma rápida redução de velocidade (consequentemente, de energia cinética), favorecendo a deposição de partículas nesse ponto. Ao longo do labirinto, existem regiões ou zonas de circulação, com características de velocidade e pressão menores do que no fluxo principal e, caso alguma partícula ali adentre, é facilmente depositada. No fim do labirinto o acúmulo é mais raro, já que esse trecho está ligado a um meio externo ao tubo, sendo a diferença de pressão grande, não favorecendo o depósito de partículas. A Figura 24A mostra um emissor obstruído por partículas depositadas no início do labirinto, sendo esse o caso mais típico.

Figura 24. Emissor de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$ obstruído: (A) Na faixa granulométrica $125\text{--}212 \mu\text{m}$, concentração 125 mg L^{-1} ; (B) Na faixa granulométrica $212\text{--}500 \mu\text{m}$, concentração 250 mg L^{-1} ; (C) Novamente na faixa granulométrica $125\text{--}212 \mu\text{m}$, concentração 125 mg L^{-1} ; (D) Novamente na faixa granulométrica $125\text{--}212 \mu\text{m}$, concentração 125 mg L^{-1}

Foi constatada uma ligeira diferença na obstrução dos gotejadores dos modelos usados nesse experimento em relação à utilização de partículas cimentantes. No experimento realizado por Lavanholi (2016), com partículas de argila, silte e areia, em concentrações semelhantes, os modelos de vazão $1,2$; $1,6$ e $1,7 \text{ L h}^{-1}$, apresentaram certo nível de obstrução, ao fim do experimento, em decorrência de propriedades cimentantes das partículas de argila e silte, em presença da areia. Mesmo assim, esses modelos tiveram uma taxa de obstrução muito menor que a apresentada pelo modelo de menor vazão ($0,6 \text{ L h}^{-1}$), e, ao fim do experimento, o número de gotejadores obstruídos em cada um desses modelos atingiu, no máximo, 60% do número de gotejadores obstruídos no modelo de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$ (LAVANHOLI, 2016). Esses dados, de uma certa maneira, corroboram com os resultados obtidos no experimento deste trabalho, onde o modelo de menor vazão (e dimensões internas do labirinto) teve um número de gotejadores obstruídos superior aos dos outros modelos testados, possivelmente pelo fato de as partículas, ou de agregados de partículas, quando propriedades cimentantes estão presentes, serem grandes para as características dimensionais internas do labirinto do modelo de menor vazão, conforme abordado por Li et al. (2006).

Os resultados obtidos neste trabalho não revelam claramente os efeitos da granulometria e da concentração de partículas na obstrução dos gotejadores, necessitando-se de mais pesquisas para se definir a participação de cada fator no processo de obstrução por partículas de areia. Todavia, é clara a possibilidade de aumento da obstrução em gotejadores com menores dimensões internas dos labirintos, inferindo-se que peças com dimensões maiores não favorecem o acúmulo de partículas em seus interiores, pelo menos para desencadear o processo de obstrução.

4.6. Posição na linha do gotejador obstruído, para o modelo de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$

A posição do emissor na linha se refere à ordem na qual o emissor está em relação ao início da linha. Não foi verificada uma tendência de obstrução de acordo com a posição do emissor na linha. As condições de pressão presentes em cada emissor eram bastante similares, assim como a condição de concentração de partículas na entrada de cada emissor.

Na Figura 25 mostra-se o número de emissores obstruídos, por posição ao longo da linha, no decorrer das 24 semanas de experimento, para cada uma das duas linhas de gotejadores de vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$. Essas 24 semanas contém os resultados para as duas repetições de todas as combinações de concentração vs. granulometria.

Figura 25. Número de obstruções, por posição (ordem) do emissor nas linhas 1 e 2, do modelo de $0,6 \text{ L h}^{-1}$, durante todo o experimento, considerando todas as faixas granulométricas e concentrações de partículas na água

Os perfis de número de emissores obstruídos obtidos nas duas linhas foram similares, não demonstrando expressivas diferenças entre si nas condições testadas nesse experimento. Vale ressaltar que as linhas experimentais, em uma condição de campo, representariam segmentos que distariam de 30% a 50% do comprimento total da linha lateral, de acordo com o critério de velocidade.

Embora não se tenham identificado diferenças devidas à ordenação do emissor na linha, Faria (2013) obteve resultados mostrando que a posição do emissor em relação à saída de água (para cima, para baixo) tem efeito no processo de obstrução. Quando o emissor está posicionado para baixo (saída de água para baixo), ele é mais susceptível à obstrução do que quando voltado para cima. No presente trabalho, todos os emissores estavam com a saída de água voltada para baixo.

5. CONCLUSÕES

O experimento realizado evidenciou diferentes comportamentos de modelos de gotejadores, sendo os modelos de vazão $1,2 \text{ L h}^{-1}$, $1,6 \text{ L h}^{-1}$ e $1,7 \text{ L h}^{-1}$ insensíveis ao fenômeno da obstrução por partículas de areia nas condições testadas.

O modelo com vazão $0,6 \text{ L h}^{-1}$ mostrou-se sensível à obstrução por partículas de areia em todas as condições testadas. Nas faixas granulométricas intermediária ($125\text{--}212 \text{ }\mu\text{m}$) e grande ($212\text{--}500 \text{ }\mu\text{m}$) as diferentes concentrações de partículas não apresentaram diferenças, sendo que todos os emissores estavam obstruídos ao fim do ensaio. Na faixa granulométrica menor, de $63\text{--}125 \text{ }\mu\text{m}$, da concentração de 250 mg L^{-1} até a concentração de 500 mg L^{-1} , houve uma ligeira tendência em aumentar o número de gotejadores obstruídos conforme o aumento da concentração.

Esse mesmo modelo de emissor, quando operado na granulometria de 63 a $125 \text{ }\mu\text{m}$ e concentração de partículas de 125 mg L^{-1} apresentou um comportamento totalmente anômalo e diferente dos demais, tendo um número bastante superior de gotejadores obstruídos. Esse comportamento foi observado nas duas repetições efetuadas. Os resultados obtidos nessa concentração e faixa granulométrica não estão coerentes com o encontrado por outros autores mencionados previamente na literatura, em seus experimentos, que indicam que o aumento de concentração de partículas na água aumenta a probabilidade do processo de obstrução dos emissores.

Os resultados encontrados não são suficientes para fazer afirmações sobre a influência da concentração e granulometria, e sua interação, na obstrução de um gotejador, sendo necessários mais estudos com novos gotejadores, para determinação da influência de cada fator na obstrução.

REFERÊNCIAS

- ADIN, A.; ELIMELECH, M. Particle Filtration for Wastewater Irrigation. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 115, n. 3, p. 474–487, 1 jun. 1989.
- ADIN, A.; SACKS, M. Dripper–clogging factors in wastewater irrigation. *Journal of the Irrigation and Drainage Engineering*, New York, v. 117, n. 6, p. 813–826, 1991.
- ALI, A.A.M. Anti–clogging drip irrigation emitter design innovation. *European International Journal of Science and Technology*, London, v.2, n.8, p.154–160, 2013.
- AL–MUHAMMAD, J.; TOMAS, S.; ANSELMET, F. Modeling a weak turbulent flow in a narrow and wavy channel: case of micro–irrigation. *Irrigation Science*, New York, v.34, n.5, p.361–377, 2016.
- AYARS, J.E.; FULTON, A.; TAYLOR, B. Subsurface drip irrigation in California – Here to stay?. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 157, p.39–47, 2015.
- BAHAR, E.; DEMIREL, K.; DEVECILER, M.; ERKEN, O.; YAVUZ, M.Y. Emitter clogging and effects on drip irrigation system performances. *African Journal of Agricultural Research*, v.5, n.7, p.532–538, 2010.
- BERNARDO, S.; SOARES, A.A.; MANTOVANI, E.C. Manual de irrigação. 8. ed. Viçosa: UFV, 2006. 625 p.
- BHATNAGAR, P.; SRIVASTAVA, R. Gravity–fed drip irrigation system for hilly terraces of the northwest Himalayas. *Irrigation Science*, Amsterdam, v.21, n.4, p.151–157, 2003.
- BRALTS, V. F.; I. P. WU; H. M. GITLIN. Drip irrigation uni Fig. 7. Annual averages of monthly emitter clogging percentages. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, v.24, p.1234–1240, 1981.
- BRALTS, V. F.; I. P. WU; H. M. GITLIN. 1982. Emitter plugging and drip irrigation lateral line hydraulics. *Trans. Amer. Soc. Agr. Eng.* 25:1274–1281.
- BRALTS, V. F.; WU, I. P.; GITLIN, H. M. Manufacturing variation and drip uniformity. *Trans. ASAE*, 24(1), p.113–119. 1981.
- BRAR, S.K.; MAHAL, S.S.; BRAR, A.S.; VASHIST, K.K.; NEERJA SHARMA BUTTAR, G.S. Transplanting time and seedling age affect water productivity, rice yield and quality in north–west India. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, n.115, p.217–222, 2016.
- BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 2, p. 149–162, 1979.
- 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, 2014, v.32, n.3, pp.181–191, 2013.
- CAMARGO, O.A.; MONIZ, A.C.; JORGE, J.A.; VALADARES, J.M.O.S. Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agronômico de Campinas. Campinas: Instituto Agronômico, 2009. 77 p. (Boletim técnico, 106).
- CAPRA, A; SCICOLONE, B. Water quality and distribution uniformity in drip/trickle irrigation systems. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, v.70, n.4, p.355–365, 1998.
- CHEN, X. ; LIU, L. ; NIU, N. Influence of fine particle size and concentration on the clogging of labyrinth emitters. *Irrigation Science*, Amsterdam, v.35, n.4, p.545–555, 2013.

- CHIGERWE, J., MANJENGWA, N., VAN DER ZAAG, P. Low head drip irrigation kits and treadle pumps for smallholder farmers in Zimbabwe: a technical evaluation based on laboratory tests. *Phys. Chem. Earth* 29, 1049–1059, 2004.
- COMPAORÉ, M. Irrigation à la parcelle. In: TIERCELIN, J. ; VIDAL, A. (ed) *Traité d'Irrigation*, Lavoisier, chap.6, p. 489–634, 2006.
- CARVALHO, L.C.C.; COELHO, R.D.; TEIXEIRA, M.B.; CUNHA, F.N.; DA SILVA, N.F.; SOARES, F.A.L.; VIDAL, V.M.; MORAIS, W.A. Entupimento de emissores autocompensantes com aplicação de sulfato e óxido de ferro. *Científica, Jaboticabal*, v.44, n.3, p.385–402, 2016.
- DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.96, p.67–79, 2009.
- 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.
- GIRÃO, E.G.; ANDRADE, E.M.; ROSA, M.F.; ARAÚJO, L.F.P.; MEIRELES, A.C.M. Seleção dos indicadores da qualidade de água no Rio Jaibaras pelo emprego da análise da componente principal. *Revista Ciência Agronômica*, Fortaleza, v. 38, n. 1, p. 17–24, 2007.
- HAMODA, M.F.; AL-GHUSAIN, I.; AL-MUTAIRI, N.I. Sand filtration of wastewater for tertiary treatment and water reuse. *Desalination*. Elsevier, Amsterdam, v.164, p.203–211, 2004.
- INSTITUTO NACIONAL DE METROLOGIA, QUALIDADE E TECNOLOGIA. DOQ-CGCRE-008: Orientação sobre validação de métodos analíticos. Rio de Janeiro, 2010, 20 p.
- INTERNATION ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 11277: Soil quality – Determination of particle size in mineral soil material – Method by sieving and sedimentation. Geneva, 2009. 34 p.
- KARMEI, D.; KELLER, J. Trickle irrigation design. S.1: Rain Bird Sprinkler Manufacturing Corporation, 1975. 133 p.
- LAMM, F.R.; CAMP, C. Subsurface drip irrigation. In: Lamm FR, Ayars JE, Nakayama FS (ed) *Micro irrigation for crop production*, Elsevier, chap. 13, p. 473–551, 2007.
- LAVANHOLI, R. Avaliação de procedimento de ensaio para determinação da sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas sólidas. 2016. 60p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- LI, G.Y.; WANG, J.D.; ALAM, M.; ZHAO, Y.F. Influence of geometrical parameters of labyrinth flow path of drip emitters on hydraulic and anti-clogging performance. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v.49, n.3, p.637–643, 2006.
- LI, Y.K.; LIU, Y.Z.; LI, G.B.; XU, T.W.; LIU, H.S.; REN, S.M.; YAN, D.Z.; YANG, P.L. Surface topographic characteristics of suspended particulates in reclaimed wastewater and effects on clogging in labyrinth drip irrigation emitters. *Irrigation Science*, New York, v. 30, n. 1, p. 43–56, 2012.
- LIU, H.; HUANG, G. (2009) Laboratory experiment on drip emitter clogging with fresh water and treated sewage effluent. *Agric Water Manag* 96 (5): p. 745–756, 2009.
- MONTGOMERY, D.C. Introdução ao controle estatístico de qualidade. 7ª ed. Rio de Janeiro : LTC, 2016.
- NAKAYAMA, F.; BOMAN, B.; PITTS, D. Maintenance. In: LAMM, F; AYARS, J; Nakayama, F. (ed) *Micro irrigation for crop production*, Elsevier, chap. 11, p. 389–427, 2007.

- NAKAYAMA, F.S.; BUCKS, D.A. Water quality in drip/trickle irrigation: A review. *Irrigation Science*, New York, v. 12, n. 4, p.187–192, 1991.
- OLIVEIRA, F.C. Processo de obstrução causado por partículas de argila em suspensão. 2017. 117p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2017.
- PAWAR, N.; BISHNOI, D.P.; SINGH, M.; DHILLON, A. Comparative economic analysis of drip irrigation vis-à-vis flood system on productivity of Bt. Cotton in Haryana. *Agricultural Science Digest*, Haryana, v.35, n.4, p.300–310, 2015.
- PEDOTT, A.H.; FOGLIATTO, F.S. Estudos de repetitividade e reprodutibilidade para dados funcionais. *Produção*, São Paulo, v.23, p. 548–560, 2013.
- PERBONI, A. Sensibilidade de gotejadores à obstrução por partículas de areia. 2016. 71p. Tese (Doutorado em Engenharia de Sistemas Agrícolas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2016.
- 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.
- PITTS, D.J.; J.A. FERGUSON.; J.T. GILMOUR, J.T. 1985. Plugging Characteristics of Drip–Irrigation Emitters Using Backwash from a Water–Treatment Plant. *Bulletin 880*, Arkansas Agricultural Experiment Station, University of Arkansas, Fayetteville.
- PUIG–BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F. Effluent particle removal by microirrigation system filters. *Spanish Journal of Agricultural Research*, Madrid, v.3, n.2, p.182–191, 2005.
- PUIG–BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; ELBANA, M.; DURAN–ROS, M.; BARRAGÁN, J.; RAMÍREZ DE CARTAGENA, F.; LAMM, F.R. Effect of flushing frequency on emitter clogging in micro irrigation with effluents. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v. 97, n. 6, p.883–891, 2010.
- PUIG–BARGUÉS, J.; LAMM, F.R. Effect of flushing velocity and flushing duration on sediment transport in micro irrigation driplines. *Transactions of the ASABE*, St. Joseph, v. 56, n. 5, p.1821–1828, 2013.
- QINGSONG, W.; YUSHENG, S.; GANG, L.; WENCHU, D.; SHUHUAI, H. Study of hydraulic performance of the eddy channel for drip emitters. *Irrigation and Drainage*, v.55, n.1, p.61–72, 2006.
- RAVINA, I.; PAZ, E.; SOFER, Z.; MARCU, A.; SCHISCHA, A.; SAGI, G.; YECHIALY, Z.; LEV, Y. Control of clogging in drip irrigation with stored treated municipal sewage effluent. *Handbook of Agricultural Engineering*, vol. I, Land and Agricultural Water Management. v.33, p.127–137, 1997.
- RESENDE, R.S.; COELHO, R.D.; PIEDADE, S.M.S. Eficiência da cloração da água de irrigação no tratamento de gotejadores com entupimento de causa biológica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.382–389, 2000.
- RESENDE, R.S.; COELHO, R.D.; PIEDADE, S.M.S. Susceptibilidade de gotejadores ao entupimento de causa biológica. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.4, n.3, p.368–375, 2000.
- RIBEIRO, P.A.A.; TEIXEIRA, M.B.; COELHO, R.D.; FRANCO, E.M.; DA SILVA, N.F.; DE CARVALHO, L.C.C.; ALVES, M.E.B. Gotejadores submetidos a condições críticas de qualidade da água. *Irriga*, Botucatu, Edição Especial, p.368–379, 2012.
- SILVA, C.A.; DA SILVA, C.J. Avaliação de uniformidade em sistemas de irrigação localizada. *Revista Científica Eletrônica de Agronomia*, Garça, ano IV, v.8, 2005.

- TANAKA, M.; GIRARD, G.; DAVIS, R.; PEUTO, A.; BIGNELL, N. Recommended table for the density of water between 0 °C and 40 °C based on recent experimental reports. *Metrologia*, v. 38, n. 4, p. 301, 2001.
- TAYLOR, H.D.; BASTOS, R.K.X.; PEARSON, H.W.; MARA, D.D. Drip irrigation with waste stabilization pond effluents: solving the problem of emitter fouling. *Water Science Technology*, London, v. 31, n. 12, p. 417–424, 1995.
- TEIXEIRA, M.B.; DE MELO, R. F.; COELHO, R.D.; RETTORE NETO, O.; RIBEIRO, P.A.A. Tratamento para desentupimento de gotejadores convencionais. *Irriga*, Botucatu, v.13, n.2, p.235–248, 2008.
- THILL, A.; MOUSTIER, S.; AZIZ, J.; WIESNER, M. R.; BOTTERO, J. Y. Flocc restructuring during aggregation: experimental evidence and numerical simulation. *Journal of Colloid and Interface Science*, Amsterdam, v. 243, n. 1, p.171–182, 2001.
- 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.
- VON WESTARP, S.; CHIENG, S.; SCHREIER, H. A comparison between low-cost drip irrigation, conventional drip irrigation, and hand watering in Nepal. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.64, n.2, p.143–160, 2004.
- WEI, Z.; CAO, M.; LIU, X.; TANG, Y.; LU, B. Flow Behaviour Analysis and Experimental Investigation for Emitter Micro-channels. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, New York, v.25, n.4, p.729–737, 2012.
- WOLTERING, L.; IBRAHIM, A.; PASTERNAK, D.; NDJEUNGA, J. The economics of low pressure drip irrigation and hand watering for vegetable production in the Sahel. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.99, n.1, p.67–73, 2011.
- ZHENG, C.Z.; BIE, Z.L.; YUAN, B.Z. Determination of optimum irrigation water amount for drip-irrigated muskmelon (*Cucumis melo* L.) in plastic greenhouse. *Irrigation Science*, New York, v. 96, p.595–602, 2009.
- ZHU, L. R.; CUI, C. L. “The clogging and its disposal methods for subsurface drip irrigation.” *J. Soil Water Conservat.*, v.12, n.2, p.111–112, 2005.

ANEXOS

ANEXO A.

Características da água e número de emissores obstruídos de cada modelo, para cada dia de ensaio.

ENSAIO		CARACTERÍSTICAS DA ÁGUA						MODELO DE EMISSOR			
Tratamento	DIA	TI (°C)	TF (°C)	pHl	pHf	CeI (μS cm ⁻¹)	CeF (μS cm ⁻¹)	0,6 L h ⁻¹	1,7 L h ⁻¹	1,2 L h ⁻¹	1,6 L h ⁻¹
								Número de emissores obstruídos			
C1G1R1	1	25,4	29,4	6,145	6,720	70,16	78,35	4	0	0	0
C1G1R1	2	25,9	30,3	5,997	6,519	90,47	102,30	6	0	0	0
C1G1R1	3	25,8	29,7	6,617	6,805	111,39	125,81	11	0	0	0
C1G1R1	4	25,6	30,6	6,455	6,767	128,58	143,51	13	0	0	0
C1G1R1	5	25,9	30,6	5,966	6,487	129,39	171,26	17	0	0	0
C1G1R2	1	26,6	31,1	7,118	7,182	154,55	176,53	4	0	0	0
C1G1R2	2	27,3	31,2	6,917	7,156	206,90	210,60	11	0	0	0
C1G1R2	3	27,0	30,5	6,641	7,353	220,50	187,11	15	0	0	0
C1G1R2	4	26,8	31,4	7,325	7,114	93,37	236,80	19	0	0	0
C1G1R2	5	27,1	31,3	7,031	7,082	232,40	273,60	23	0	0	0
C2G1R1	1	28,5	27,2	6,900	7,013	72,78	80,68	1	0	0	0
C2G1R1	2	26,9	31,2	6,613	6,902	94,08	99,69	1	0	0	0
C2G1R1	3	26,3	30,4	6,088	6,557	110,00	122,82	1	0	0	0
C2G1R1	4	25,3	28,0	4,863	6,053	139,02	148,95	2	0	0	0
C2G1R1	5	23,2	27,9	6,307	6,445	128,53	174,47	2	0	0	0
C2G1R2	1	29,4	31,0	6,900	7,013	99,28	97,02	0	0	0	0
C2G1R2	2	27,8	31,1	6,613	6,902	119,80	126,63	2	0	0	0
C2G1R2	3	26,8	31,1	6,088	6,557	149,55	147,30	2	0	0	0
C2G1R2	4	26,9	30,4	4,863	6,053	163,49	181,90	3	0	0	0
C2G1R2	5	27,5	29,5	6,307	6,445	205,00	227,50	6	0	0	0
C3G1R1	1	24,7	29,6	5,386	7,611	75,76	85,06	1	0	0	0
C3G1R1	2	25,5	29,3	5,010	7,270	107,29	125,68	2	0	0	0
C3G1R1	3	25,2	28,9	5,278	7,192	126,30	149,18	3	0	0	0
C3G1R1	4	25,1	29,1	6,713	7,081	147,55	167,92	4	0	0	0
C3G1R1	5	24,8	29,7	6,590	6,990	181,04	189,87	5	0	0	0
C3G1R2	1	26,2	30,9	5,255	7,282	80,35	97,96	0	0	0	0
C3G1R2	2	26,6	30,8	5,428	6,915	122,81	110,29	3	0	0	0
C3G1R2	3	26,9	30,9	5,290	6,570	129,47	135,94	4	0	0	0
C3G1R2	4	26,7	30,5	5,960	6,807	155,17	148,57	9	0	0	0
C3G1R2	5	26,0	30,1	6,850	6,915	153,21	171,74	10	0	0	0
C4G1R1	1	25,3	30,4	6,811	7,168	116,39	127,94	2	0	0	0
C4G1R1	2	26,1	30,0	6,823	6,938	137,61	149,12	2	0	0	0
C4G1R1	3	24,8	29,6	6,641	6,883	160,73	176,68	7	0	0	0
C4G1R1	4	25,5	29,0	6,620	6,721	189,50	212,30	8	0	0	0
C4G1R1	5	24,9	29,8	4,680	6,530	251,80	235,80	11	0	0	0
C4G1R2	1	25,9	30,0	4,660	6,748	112,19	108,71	1	0	0	0
C4G1R2	2	26,1	28,7	6,349	7,177	127,61	105,84	3	0	0	0
C4G1R2	3	25,6	28,8	7,080	6,946	104,60	127,96	3	0	0	0
C4G1R2	4	24,7	28,5	6,339	6,969	135,15	149,23	3	0	0	0

C4G1R2	5	24,0	28,3	5,881	6,847	155,81	169,21	5	0	0	0
C1G2R1	1	25,1	25,5	6,369	7,518	468,50	495,50	17	0	0	0
C1G2R1	2	18,7	24,3	6,139	7,154	499,00	518,30	25	0	0	0
C1G2R1	3	21,8	26,6	4,690	7,060	125,83	165,24	25	1	0	0
C1G2R1	4	22,0	25,5	4,930	6,600	168,52	193,43	25	1	0	0
C1G2R1	5	22,0	27,7	6,860	6,912	209,90	212,50	25	1	0	0
C1G2R2	1	23,8	28,3	7,258	7,628	78,34	84,08	9	0	0	0
C1G2R2	2	23,7	28,8	6,799	7,451	101,96	104,69	17	0	0	0
C1G2R2	3	24,5	29,7	5,291	6,716	138,34	128,07	21	0	0	1
C1G2R2	4	24,6	29,2	6,891	7,079	150,54	133,17	24	1	0	0
C1G2R2	5	23,9	25,3	7,578	7,648	153,10	148,93	24	1	0	0
C2G2R1	1	28,5	27,2	6,900	7,013	72,78	80,68	24	0	0	0
C2G2R1	2	26,9	31,2	6,613	6,902	94,08	99,69	25	0	0	0
C2G2R1	3	26,3	30,4	6,088	6,557	110,00	122,82	25	0	0	0
C2G2R1	4	25,3	28,0	4,863	6,053	139,02	148,95	25	0	0	0
C2G2R1	5	23,2	27,9	6,307	6,445	128,53	174,47	26	0	0	0
C2G2R2	1	24,0	29,4	7,660	7,908	31,26	44,94	19	0	0	0
C2G2R2	2	25,2	27,8	4,966	6,319	84,51	74,02	22	0	0	0
C2G2R2	3	25,2	28,9	4,966	5,332	110,43	71,78	24	0	0	0
C2G2R2	4	25,0	29,2	6,469	7,143	69,33	76,86	24	1	0	0
C2G2R2	5	25,4	29,7	5,374	6,356	101,24	92,64	25	1	0	0
C3G2R1	1	29,1	28,1	7,060	7,541	86,57	81,06	13	0	0	0
C3G2R1	2	27,0	27,8	5,212	6,905	155,61	170,95	20	0	0	0
C3G2R1	3	25,0	28,8	6,836	6,921	176,66	175,42	25	0	0	0
C3G2R1	4	24,0	27,5	4,918	6,599	200,80	213,10	26	0	0	0
C3G2R1	5	24,5	28,8	6,741	6,920	197,43	226,20	26	0	0	0
C3G2R2	1	22,8	28,4	7,350	7,416	34,41	34,43	13	0	0	0
C3G2R2	2	24,2	26,6	5,756	7,340	74,38	54,06	22	0	0	0
C3G2R2	3	22,8	27,1	5,942	7,053	73,30	68,65	25	0	0	1
C3G2R2	4	22,0	25,8	5,325	4,040	91,57	96,28	25	0	0	1
C3G2R2	5	21,7	25,9	5,210	6,770	117,22	99,70	25	1	0	1
C4G2R1	1	24,9	28,3	4,624	6,500	10,20	105,46	10	0	0	0
C4G2R1	2	23,8	27,5	5,210	6,740	151,29	122,40	19	0	0	0
C4G2R1	3	24,3	26,7	6,586	7,370	153,94	164,54	22	0	0	0
C4G2R1	4	22,6	27,0	5,080	5,910	175,59	191,29	24	0	0	0
C4G2R1	5	21,1	26,3	6,020	6,820	204,80	222,00	25	1	0	0
C4G2R2	1	22,8	28,4	7,350	7,416	34,41	34,43	19	0	0	0
C4G2R2	2	24,2	26,6	5,756	7,340	74,38	54,06	22	0	0	0
C4G2R2	3	22,8	27,1	5,942	7,053	73,30	68,65	24	0	0	0
C4G2R2	4	22,0	25,8	5,325	4,040	91,57	96,28	24	0	0	0
C4G2R2	5	21,7	25,9	5,210	6,770	117,22	99,70	25	0	0	0

C1G3R1	1	25,9	27,8	7,200	6,970	195,03	173,27	16	0	0	0
C1G3R1	2	24,7	30,2	6,020	7,100	182,57	194,44	24	0	0	0
C1G3R1	3	25,9	30,4	4,780	5,960	208,60	221,30	25	0	0	0
C1G3R1	4	25,0	28,0	5,400	5,540	245,10	265,80	26	0	0	0
C1G3R1	5	22,9	25,0	6,051	6,232	244,10	258,40	26	0	0	0
C1G3R2	1	21,6	28,8	7,467	8,170	48,20	37,08	18	0	0	0
C1G3R2	2	22,3	26,9	5,418	6,922	67,00	50,59	23	0	0	0
C1G3R2	3	21,7	27,0	5,217	5,855	72,58	71,08	23	0	0	0
C1G3R2	4	22,5	27,0	6,266	6,883	88,17	79,82	25	0	0	0
C1G3R2	5	23,1	25,1	6,997	7,471	102,69	107,89	26	0	0	0
C2G3R1	1	24,6	28,7	6,601	6,569	73,52	83,76	16	0	0	0
C2G3R1	2	23,4	27,1	6,657	6,666	94,14	105,20	23	0	0	0
C2G3R1	3	21,7	25,4	6,447	6,515	110,19	125,77	26	0	0	0
C2G3R1	4	20,7	26,6	6,479	6,683	123,22	146,29	26	0	0	0
C2G3R1	5	21,7	28,4	6,608	6,736	157,55	163,80	26	0	0	0
C2G3R2	1	23,9	26,2	6,959	7,577	31,83	38,97	24	1	0	0
C2G3R2	2	22,1	26,3	5,841	6,905	59,12	51,69	25	1	0	0
C2G3R2	3	21,9	26,3	5,207	5,996	77,20	72,61	26	0	0	0
C2G3R2	4	20,6	25,4	4,921	5,900	93,06	88,10	26	0	0	0
C2G3R2	5	21,5	26,0	5,254	6,124	109,29	103,19	26	0	0	0
C3G3R1	1	23,6	29,8	6,951	7,001	52,72	67,16	18	0	0	0
C3G3R1	2	24,4	25,3	6,958	6,997	75,09	91,67	23	0	0	0
C3G3R1	3	24,3	29,9	6,459	6,798	144,13	112,02	26	0	0	0
C3G3R1	4	25,4	29,9	6,488	6,677	115,50	128,04	26	0	0	0
C3G3R1	5	25,8	30,3	6,377	6,620	137,04	147,99	26	0	0	0
C3G3R2	1	20,4	25,8	6,667	7,231	45,10	34,37	26	0	0	0
C3G3R2	2	21,4	25,8	5,299	6,268	62,02	57,39	26	0	0	0
C3G3R2	3	22,7	27,4	6,601	7,104	62,27	70,50	26	0	0	0
C3G3R2	4	22,2	26,8	6,089	6,650	84,78	84,78	26	0	0	0
C3G3R2	5	21,4	26,2	6,110	6,673	103,14	110,89	26	0	0	0
C4G3R1	1	26,6	28,0	4,100	5,296	91,55	86,79	26	0	0	0
C4G3R1	2	23,5	28,0	6,194	6,591	79,17	103,81	26	0	0	0
C4G3R1	3	23,7	29,3	6,618	6,703	113,62	125,44	26	0	0	0
C4G3R1	4	25,3	29,0	5,958	6,502	136,31	143,55	26	0	0	1
C4G3R1	5	23,5	29,0	6,629	6,604	161,41	161,80	26	0	0	1
C4G3R2	1	20,4	25,8	6,667	7,231	45,10	34,37	23	1	0	0
C4G3R2	2	21,4	25,8	5,299	6,268	62,02	57,39	25	1	0	0
C4G3R2	3	22,7	27,4	6,601	7,104	62,27	70,50	26	1	0	0
C4G3R2	4	22,2	26,8	6,089	6,650	84,78	84,78	26	2	0	0
C4G3R2	5	21,4	26,2	6,110	6,673	103,14	110,89	26	2	0	0

Concentrações: C1: 0,125 g L⁻¹, C2: 0,250 g L⁻¹, C3: 0,375 g L⁻¹, C4: 0,500 g L⁻¹. Granulometrias: G1: Faixa granulométrica de 63-125 µm, G2: Faixa granulométrica de 125-212 µm, G3: Faixa granulométrica de 212-500 µm. Temperatura: TI: Temperatura Inicial (°C), TF: Temperatura Final (°C). pH: pHI: pH Inicial, pHF: pH Final. Condutividade elétrica: Cel: Condutividade elétrica inicial (µS cm⁻¹), CeF: Condutividade elétrica final (µm cm⁻¹)

ANEXO B. Média (q_{med} , L h⁻¹), desvio-padrão amostral (S_q , L h⁻¹) e coeficiente de variação devido a efeitos de fabricação (CVF_q, %) das vazões de cada modelo de emissor, testados com água limpa, no início de cada semana de ensaios.

Tratamento	MODELO DE EMISSOR											
	0,6 L h ⁻¹			1,7 L h ⁻¹			1,2 L h ⁻¹			1,6 L h ⁻¹		
	q_{med}	S_q	CV	q_{med}	S_q	CV	q_{med}	S_q	CV	q_{med}	S_q	CV
C1G1R1	0,53	0,01	1,32	1,50	0,02	1,27	1,12	0,02	1,69	1,40	0,03	2,24
C1G1R2	0,53	0,01	1,20	1,49	0,02	1,01	1,14	0,02	1,45	1,40	0,03	1,90
C2G1R1	0,53	0,01	1,63	1,49	0,02	1,16	1,13	0,02	1,70	1,41	0,03	1,96
C2G1R2	0,54	0,01	1,52	1,51	0,03	1,85	1,16	0,02	1,80	1,41	0,04	3,08
C3G1R1	0,53	0,01	1,97	1,52	0,02	1,52	1,15	0,02	1,61	1,41	0,03	1,98
C3G1R2	0,53	0,01	1,82	1,51	0,02	1,09	1,17	0,03	2,15	1,41	0,03	2,17
C4G1R1	0,53	0,01	1,07	1,51	0,02	1,37	1,16	0,02	1,97	1,43	0,04	2,52
C4G1R2	0,53	0,01	1,65	1,50	0,02	1,37	1,14	0,02	1,74	1,39	0,02	1,67
C1G2R1	0,54	0,01	1,84	1,54	0,02	1,30	1,14	0,02	1,72	1,41	0,02	1,73
C1G2R2	0,53	0,01	1,68	1,51	0,02	1,45	1,13	0,03	2,57	1,39	0,02	1,46
C2G2R1	0,53	0,01	1,65	1,50	0,02	1,07	1,13	0,04	3,18	1,39	0,04	2,63
C2G2R2	0,53	0,01	1,69	1,50	0,03	1,92	1,13	0,02	2,06	1,40	0,03	2,25
C3G2R1	0,51	0,01	1,78	1,45	0,04	2,71	1,11	0,02	2,26	1,37	0,04	2,72
C3G2R2	0,53	0,01	1,67	1,50	0,03	1,71	1,15	0,02	2,10	1,40	0,04	2,70
C4G2R1	0,52	0,01	1,72	1,50	0,02	1,25	1,12	0,02	2,01	1,39	0,04	2,54
C4G2R2	0,53	0,01	1,46	1,50	0,03	1,84	1,16	0,02	1,92	1,41	0,03	2,42
C1G3R1	0,52	0,01	1,75	1,50	0,03	2,10	1,13	0,02	1,79	1,40	0,03	1,89
C1G3R2	0,53	0,01	1,36	1,51	0,02	1,33	1,15	0,02	1,87	1,41	0,04	2,73
C2G3R1	0,55	0,01	2,53	1,52	0,03	1,92	1,15	0,02	2,09	1,43	0,03	2,24
C2G3R2	0,53	0,01	1,78	1,51	0,03	1,84	1,17	0,03	2,86	1,41	0,04	3,08
C3G3R1	0,53	0,01	1,52	1,50	0,02	1,36	1,11	0,02	1,38	1,40	0,03	1,89
C3G3R2	0,54	0,01	1,78	1,53	0,02	1,29	1,16	0,02	1,62	1,42	0,04	2,50
C4G3R1	0,53	0,01	1,35	1,50	0,02	1,59	1,12	0,02	2,17	1,42	0,04	2,62
C4G3R2	0,53	0,01	1,14	1,52	0,02	1,18	1,18	0,04	3,72	1,43	0,04	2,55