

# Eficiência de filtros de areia pressurizados na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação

Fábio Ponciano de Deus<sup>(1)</sup>, Roberto Testezlaf<sup>(2)</sup> e Marcio Mesquita<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Campus Universitário, Caixa Postal 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG, Brasil. E-mail: fabio.ponciano@deg.ufla.br <sup>(2)</sup>Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola, Avenida Cândido Rondon, nº 501, Barão Geraldo, CEP 13083-875 Campinas, SP, Brasil. E-mail: bob@feagri.unicamp.br <sup>(3)</sup>Universidade Estadual de Goiás, Rua Protestato Joaquim Bueno, nº 945, Centro, CEP 75920-000 Santa Helena de Goiás, GO, Brasil. E-mail: marciomes@gmail.com

**Resumo** – O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de filtros de areia com diferentes granulometrias na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação, bem como a perda de pressão em função da taxa de filtração e da granulometria de areia do leito filtrante. Os ensaios foram realizados com três filtros de um mesmo modelo comercial, testados com diferentes combinações de granulometrias de areia (areia fina, 0,55 mm; média, 0,77 mm; e grossa, 1,04 mm de diâmetro) e taxas de filtração (20, 40, 60 e 75 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), e repetidos em três ciclos de filtração de 4 horas (C1, C2 e C3, realizados em 3 dias consecutivos). O filtro de areia avaliado é efetivo na remoção de partículas a partir do tamanho de areia fina (>60 µm). Nesta faixa de remoção de partículas, a influência da taxa de filtração aumenta com a diminuição do tamanho de partícula na água. O aumento na taxa de filtração, associado à diminuição da granulometria de areia, aumenta a eficiência de remoção, mas acentua a perda de pressão com o tempo, o que diminui a remoção das partículas menores ao longo dos ciclos de filtração.

**Termos para indexação:** eficiência de remoção, entupimento de emissores, irrigação localizada, taxa de filtração, tratamento da água.

## Efficiency of pressurized sand filters in removing different particle sizes from irrigation water

**Abstract** – The objective of this work was to evaluate the efficiency of sand filters of different granulometry in removing different particles sizes from irrigation water, as well as the pressure loss due to the filtration rate and sand particle size of the filter bed. The trials were conducted with three sand filters of the same commercial model, tested with different combinations of sand particle sizes (fine, 0.55 mm; medium, 0.77 mm; and coarse sand, 1.04 mm diameter) and filtration rates (20, 40, 60, and 75 m<sup>3</sup> m<sup>-2</sup> h<sup>-1</sup>), repeated in three 4-hour filtration cycles (C1, C2, and C3, carried out in 3 consecutive days). The evaluated sand filter is effective in the removal of particles starting at the fine sand size (>60 µm). In this particle removal range, the influence of the filtration rate increases with decreasing particle size in the water. The increase in the filtration rate, associated with the reduction in sand granulometry, increases removal efficiency, but accentuates pressure loss in time, which decreases the removal of smaller particles during the filtration process.

**Index terms:** removal efficiency, emitter clogging, localized irrigation, filtration rate, water treatment.

## Introdução

O entupimento de emissores é um dos principais problemas na utilização de sistemas de irrigação localizada, uma vez que um pequeno número de emissores obstruídos pode afetar a uniformidade de distribuição e reduzir a produtividade das culturas (Borssoi et al., 2012).

Uma das soluções para o agricultor é o emprego de filtros de areia pressurizados, recomendados para o tratamento físico de águas utilizadas na irrigação, por apresentarem desempenho superior na retenção

de partículas orgânicas e de algas (Puig-Bargués et al., 2005a, 2005b; Testezlaf, 2008; Duran-Ros et al., 2009). Além disso, esses filtros apresentam maior faixa de remoção que os filtros de tela e de disco, e são capazes de reter partículas maiores que 12,5 µm (parte do silte) e de acumular maiores quantidades de contaminantes ao longo da camada de areia, antes da realização da limpeza (Testezlaf, 2008).

O uso desse equipamento inicia-se com o processo de filtração, em que determinado volume de impurezas é removido pela passagem forçada da água pela camada filtrante. Esse processo aumenta a perda de pressão nos

filtros com o tempo (Awady et al., 2008). O aumento na perda de pressão, associado à possibilidade de diminuição da eficiência de remoção de partículas no processo, determina a necessidade da limpeza da camada, pelo processo de retrolavagem (Salcedo et al., 2011).

A avaliação do processo de filtração em filtros de areia baseia-se na determinação da eficiência de remoção de determinado componente físico, químico ou biológico contido na água (Haman & Zazueta, 1994). A norma Asabe (1994) de avaliação de filtros de areia recomenda utilizar a concentração de sólidos suspensos totais (SST) na água como parâmetro de avaliação; entretanto, esse tipo de avaliação não identifica a faixa de diâmetro das partículas removidas, e altos índices de eficiência estimados com dados de SST podem estar relacionados à baixa eficiência de remoção de determinada faixa de diâmetro de partícula, o que pode causar o entupimento dos emissores do sistema de irrigação localizada. Nesse sentido, a avaliação da eficiência de remoção pela aplicação do conceito da distribuição do tamanho das partículas contidas na água, conforme proposto por Puig-Bargués et al. (2005a), pode contribuir para um melhor entendimento do equipamento, bem como revelar processos não detectados pelo método convencional de avaliação, como o desprendimento de partículas do leito filtrante (Di Bernardo & Dantas, 2005).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a eficiência de filtros de areia com diferentes granulometrias na remoção de diferentes tamanhos de partículas da água de irrigação, bem como a perda de pressão em função da taxa de filtração e da granulometria de areia do leito filtrante.

## Material e Métodos

A pesquisa foi realizada em um módulo experimental montado com três filtros de areia, conectados em paralelo (F1, F2 e F3), e um quarto equipamento (FR) instalado para viabilizar a limpeza dos filtros. Esses equipamentos foram alimentados por uma única adutora, para garantir a entrada da mesma qualidade de afluente em todos os ensaios.

A água utilizada foi proveniente de um reservatório próximo à área experimental, pertencente a uma microbacia com predominância de Latossolo Vermelho distroférico. A coleta de água no experimento foi

realizada nas tubulações de entrada e saída de cada filtro de areia avaliado (F1, F2 e F3), com auxílio de registros de acionamento rápido.

O módulo experimental também era composto por registros de agulha e de gaveta, que propiciavam a operação dos ensaios; sensores de vazão do tipo eletromagnético, uma unidade por filtro, modelo Signet 2551 (Georg Fischer Sistemas de Tubulações Ltda., São Paulo, SP) e tomadas de pressão do tipo integral (duas unidades por filtro – entrada e saída), instalados de acordo com a norma da Asabe (1994) de posicionamento em tubulações; transdutores de pressão MPX 5500DP (Freescale Semicondutores Brasil Ltda., Campinas, SP), duas unidades por cada filtro avaliado; e sistema de aquisição de dados composto por uma placa de aquisição – módulo USB-6341 da série X (National Instruments Brazil, São Paulo, SP), conectada a um laptop – e gerenciado por uma interface computacional desenvolvida no programa Labview (National Instruments Brazil, São Paulo, SP).

O material filtrante utilizado foi a areia de sílica, em três granulometrias: G1, areia fina ( $D_{10}=0,55$  mm, isto é, 10% das partículas com diâmetro  $\leq 55$   $\mu$ m, e coeficiente de uniformidade  $CU=1,34$ ); G2, areia média ( $D_{10}=0,77$  mm e  $CU=1,28$ ); e G3, areia grossa ( $D_{10}=1,04$  mm e  $CU=1,36$ ), para uma altura fixa de 0,35 m, de acordo com as recomendações do fabricante dos filtros.

Os valores de taxa de filtração avaliados foram de 20, 40, 60 e 75  $m^3 m^{-2} h^{-1}$ , denominados de TF20, TF40, TF60 e TF75, os quais abrangem as recomendações de Testezlaf (2008).

Os ensaios de filtração foram realizados concomitantemente nos três filtros de areia (F1, F2 e F3), e foram estabelecidos a partir da combinação das granulometrias de areia do leito filtrante e das taxas de filtração (TF20, TF40, TF60 e TF75), em três ciclos de filtração de 240 min (C1, C2 e C3), realizados em dias subsequentes. Após cada ciclo de filtração, realizou-se a limpeza da camada filtrante com retrolavagens que atingiam 25% de expansão, operacionalizadas com auxílio dos visores instalados nos equipamentos.

A avaliação do processo de filtração baseou-se na determinação da eficiência de remoção ( $ER_{DP}$ ), que utilizou resultados do percentual volumétrico de diferentes faixas de diâmetro de partículas presentes nas amostras de água ( $V_{DP}$ ). A  $ER_{DP}$  foi determinada de acordo com a seguinte equação:

$ER_{DP} = (1 - V_{DP2}/V_{DP1})100$ , em que  $V_{DP1}$  é a faixa de diâmetro de partículas presentes na água antes da passagem no filtro, e  $V_{DP2}$  é a faixa presente após a passagem. Dessa forma, a avaliação foi realizada em dois momentos no decorrer da filtração: início, 0 min; e fim, 240 min. O percentual em volume de diferentes tamanhos de partículas contidas na água foi determinado com auxílio do equipamento Mastersizer 2000 (Malvern Instruments Inc., Worcestershire, Reino Unido), com faixa de leitura de 0,02 a 2.000  $\mu\text{m}$ , e os resultados foram agrupados em faixas de diâmetro de partículas conhecidas: <2  $\mu\text{m}$ , argila; 2–60  $\mu\text{m}$ , silte; 60–200  $\mu\text{m}$ , areia fina; 200–600  $\mu\text{m}$ , areia média; e 600–2.000  $\mu\text{m}$ , areia grossa, para posterior análise de eficiência.

Para que se tivesse mais um parâmetro de controle que indicasse o tratamento com maior remoção de partículas, a variação da perda de pressão dos filtros foi monitorada em função do tempo de filtração, tendo-se analisado as inclinações das curvas obtidas para delimitar o tratamento mais eficaz.

Os valores de eficiência de remoção foram analisados graficamente, e os dados de perda de pressão em função do tempo de filtração foram ajustados ao modelo linear. Utilizou-se a análise de variância, a 5% de probabilidade, para determinar a significância dos tratamentos, e a análise de regressão foi realizada de acordo com a qualidade do ajuste. O programa Sigmaplot, versão 11.0 (Systat Software, Inc., Chicago, IL, EUA), foi utilizado para auxiliar nas análises estatísticas. Os filtros de areia foram utilizados como repetições experimentais.

## Resultados e Discussão

A água utilizada no experimento apresentou valor médio de  $5,20 \pm 3,09 \text{ mg L}^{-1}$  de SST, que, de acordo com a classificação de águas de Bucks et al. (1979), oferece baixo risco ao entupimento de gotejadores (<50  $\text{mg L}^{-1}$ ). Esses sólidos foram compostos, em média, por 83,44% de silte, 7,79% de argila, 7,71% de areia fina, 0,95% de areia média e 0,09% de areia grossa.

Com relação à caracterização hidráulica dos ensaios, os tratamentos que apresentaram diferença significativa na relação entre a perda de pressão e o tempo de filtração (Tabela 1) foram ajustados ao modelo linear (Figura 1), com exceção do tratamento G3TF20.

Em todas as condições avaliadas, a perda de pressão aumentou com o tempo, e as curvas tiveram sua inclinação aumentada com a elevação da taxa de filtração e com a diminuição na granulometria de areia. Além disso, o uso da granulometria mais fina, associado a maiores taxas de filtração, resultou nas maiores perdas iniciais de pressão (perda de pressão referente ao filtro de areia limpo), o que também foi constatado por Mesquita et al. (2012). Esse resultado pode estar relacionado à diferença na eficiência de remoção entre os tratamentos, em que os com menor granulometria de areia operaram a maiores taxas de filtração e proporcionaram maior remoção de partículas.

Os ensaios, que combinaram os tratamentos de taxa de filtração, granulometrias de areia, ciclo de filtração e tempo de coleta, evidenciaram diferenças nos valores de eficiência de remoção, para as diferentes faixas de diâmetro de partículas analisadas, tendo-se observado que a eficiência nas respectivas faixas de remoção aumentou com o aumento no diâmetro das partículas contidas na água (Figura 2).

Valores negativos de eficiência de remoção foram verificados na faixa de tamanho referente à argila e ao silte, o que significa que a quantidade de partículas nessa classe de diâmetro que saía do equipamento no instante da amostragem foi maior que a quantidade que entrava no filtro, provavelmente em razão do desprendimento de partículas aderidas ao meio filtrante antes do início do processo de filtração (Di Bernardo & Dantas, 2005). Nos casos em que foram obtidos valores positivos de eficiência de remoção dessas partículas, a magnitude foi menor que a encontrada em faixas com diâmetro de partículas maior (areia fina, média e grossa). Assim,

**Tabela 1.** Análise de regressão da perda de pressão (kPa) em função do tempo de filtração (min), para as diferentes combinações avaliadas de taxas de filtração e granulometrias de areia no filtro<sup>(1)</sup>.

Taxa de filtração ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ )	Granulometria G1		Granulometria G2		Granulometria G3	
	QM	R <sup>2</sup> (%)	QM	R <sup>2</sup> (%)	QM	R <sup>2</sup> (%)
20	28,23*	99,76	3,68*	99,32	0,38 <sup>ns</sup>	88,98
40	942,88*	99,03	78,55*	98,38	17,20*	85,53
60	1.160,44*	99,81	357,33*	99,37	39,29*	99,57
75	2.001,55*	99,40	602,89*	98,79	43,87*	99,88

<sup>(1)</sup>G1, areia fina,  $D_{10}=0,55 \text{ mm}$ , isto é, 10% das partículas com diâmetro  $\leq 55 \text{ mm}$ , e coeficiente de uniformidade  $CU=1,34$ ; G2, areia média,  $D_{10}=0,77 \text{ mm}$  e  $CU=1,28$ ; e G3, areia grossa,  $D_{10}=1,04 \text{ mm}$  e  $CU=1,36$ .

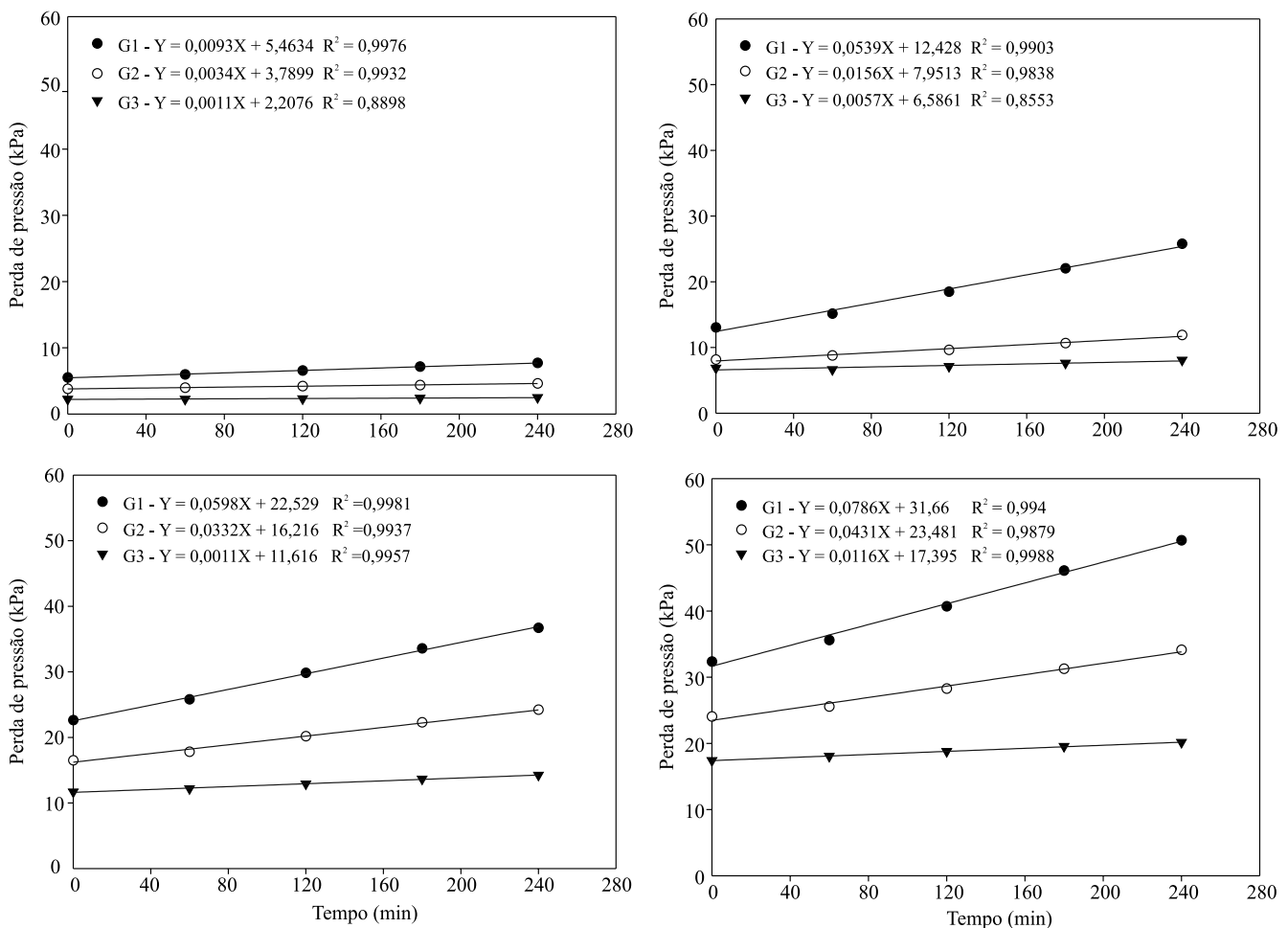
<sup>ns</sup>Não significativo. \*Significativo a 5% de probabilidade.

pode-se afirmar que a faixa de diâmetro de partícula compreendida entre  $<2,0$  e  $60 \mu\text{m}$  (argila e silte), no afluente testado, não foi removida eficientemente pelo modelo de filtro de areia nas granulometrias de areia e taxas de filtração avaliadas.

Pizarro Cabello (1996) salienta que a remoção de partículas em suspensão na água ocorre quando estas apresentam limite inferior de tamanho igual a  $1/12$  a  $1/10$  do diâmetro efetivo do meio filtrante. De acordo com o diâmetro efetivo das areias avaliadas no experimento, a remoção de partículas para G1 é efetiva entre  $46$  e  $55 \mu\text{m}$ ; para G2, entre  $64$  e  $77 \mu\text{m}$ ; e para G3, entre  $84$  e  $101 \mu\text{m}$ . Contudo, mesmo com o limite inferior indicado para a remoção de partículas de silte, a areia mais fina (G1) não foi capaz de reter

eficientemente partículas com esse diâmetro presentes no afluente.

Pizarro Cabello (1996) afirma que, para evitar a obstrução dos emissores, o meio filtrante selecionado deve reter partículas maiores que  $1/10$  do diâmetro de saída dos gotejadores e maiores que  $1/5$  do diâmetro de saída dos microaspersores. Ao se considerar um diâmetro de saída médio de  $0,6 \text{ mm}$  ( $600 \mu\text{m}$ ), para gotejadores, e de  $1,5 \text{ mm}$  ( $1.500 \mu\text{m}$ ), para microaspersores, o meio filtrante deve ser capaz de remover partículas maiores que  $60 \mu\text{m}$ , para gotejadores, e que  $300 \mu\text{m}$ , para microaspersores. Com base na faixa de remoção observada no presente trabalho (remoção a partir de  $60 \mu\text{m}$ ), o filtro de areia avaliado, nas diferentes condições experimentais,



**Figura 1.** Variação da perda de pressão em função do tempo de filtração, para as diferentes combinações avaliadas de taxas de filtração e granulometrias da areia no filtro. TF20, TF40, TF60 e TF75 referem-se, respectivamente, às taxas de filtração de  $20$ ,  $40$ ,  $60$  e  $75 \text{ m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ ; e G1, G2 e G3 referem-se, respectivamente, às granulometrias de areia fina,  $D_{10}=0,55 \text{ mm}$ ; média,  $D_{10}=0,77 \text{ mm}$ ; e grossa,  $D_{10}=1,04 \text{ mm}$ .



**Figura 2.** Variação média da eficiência de remoção ( $ER_{DP}$ ) no processo de filtração, para as faixas de diâmetro de partículas contidas na água, para as diferentes combinações de granulometria de areia no filtro, taxas e ciclos de filtração, no início e no fim do processo. TF20, TF40, TF60 e TF75 referem-se, respectivamente, às taxas de filtração de 20, 40, 60 e 75  $m^3 m^{-2} h^{-1}$ ; e G1, G2 e G3 referem-se, respectivamente, às granulometrias de areia fina,  $D_{10}=0,55$  mm; média,  $D_{10}=0,77$  mm; e grossa,  $D_{10}=1,04$  mm.

apresentou faixa de remoção capaz de evitar obstrução dos emissores de sistemas de irrigação localizada.

A magnitude dos valores de eficiência de remoção para as faixas relativas às areias fina, média e grossa comprova que partículas de maior tamanho, contidas na água, apresentam maior probabilidade de serem removidas. Apesar da capacidade de se detectar partículas na faixa de areia grossa, apenas o tratamento G2TF20C1 mostrou a presença dessas partículas.

Os resultados de eficiência de remoção estão de acordo com Testezlaf (2008), que relata que a efetividade do filtro de areia para remoção na faixa de diâmetros vai de parte da fração de silte até areia grossa. Segundo Puig-Bargués et al. (2005a), o filtro de areia apresenta eficiência de remoção positiva a partir de 25  $\mu\text{m}$  e atinge 100% de eficiência a partir do diâmetro de 125  $\mu\text{m}$ . No presente trabalho, as maiores remoções ocorreram a partir da faixa de areia fina, na qual o diâmetro de 125  $\mu\text{m}$  está inserido. Portanto, é possível afirmar que o modelo de filtro de areia avaliado, nas taxas de filtração e nas granulometrias propostas, foi eficaz na remoção de partículas suspensas contidas na água, a partir do diâmetro de areia fina (>60  $\mu\text{m}$ ).

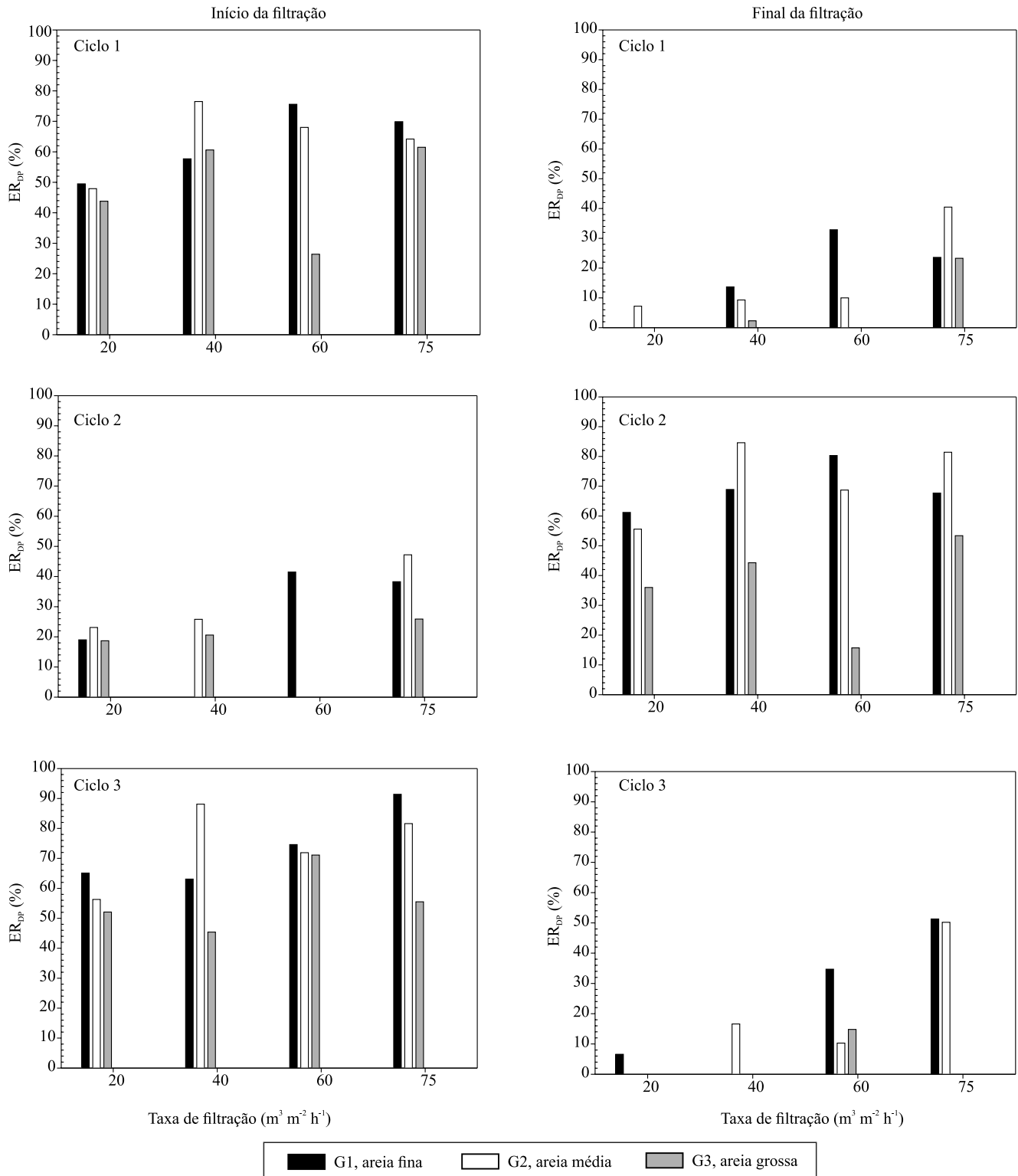
O efeito das variáveis independentes do experimento (taxa de filtração, granulometrias de areia, ciclo de filtração e tempo de coleta) na eficiência de remoção foi observado para as faixas de tamanho de partículas referentes à areia fina e média no início (Figura 3) e no final da filtração (Figura 4). Alguns resultados para a faixa de areia média não geraram informações, como os dos tratamentos: G1TF20C3 e G2TF20C3, no início da filtração; e G2TF20C1, G2TF40C1, G1TF40C2, G2TF20C2, G2TF40C2, G1TF20C3 e G2TF20C3, no final. Nas figuras, os valores negativos de eficiência de remoção foram considerados iguais à zero para melhor visualização do processo.

Com relação à taxa de filtração, a eficiência de remoção referente à faixa de diâmetro de areia fina aumentou com o incremento da taxa de filtração, para todas as granulometrias de areia avaliadas (Figura 3). Para a granulometria G1, o melhor resultado, tanto no início (68%) quanto no final do processo (32,9%), foi obtido com o uso da taxa de filtração TF60, tendo-se observado decréscimo da remoção para a TF75. Nas granulometrias G2 e G3, a TF40 proporcionou, no início, o ponto máximo de remoção (76,5 e 60,6%, respectivamente); no final do processo, no entanto, o ponto de máxima deslocou-se para a TF75 (40,5 e

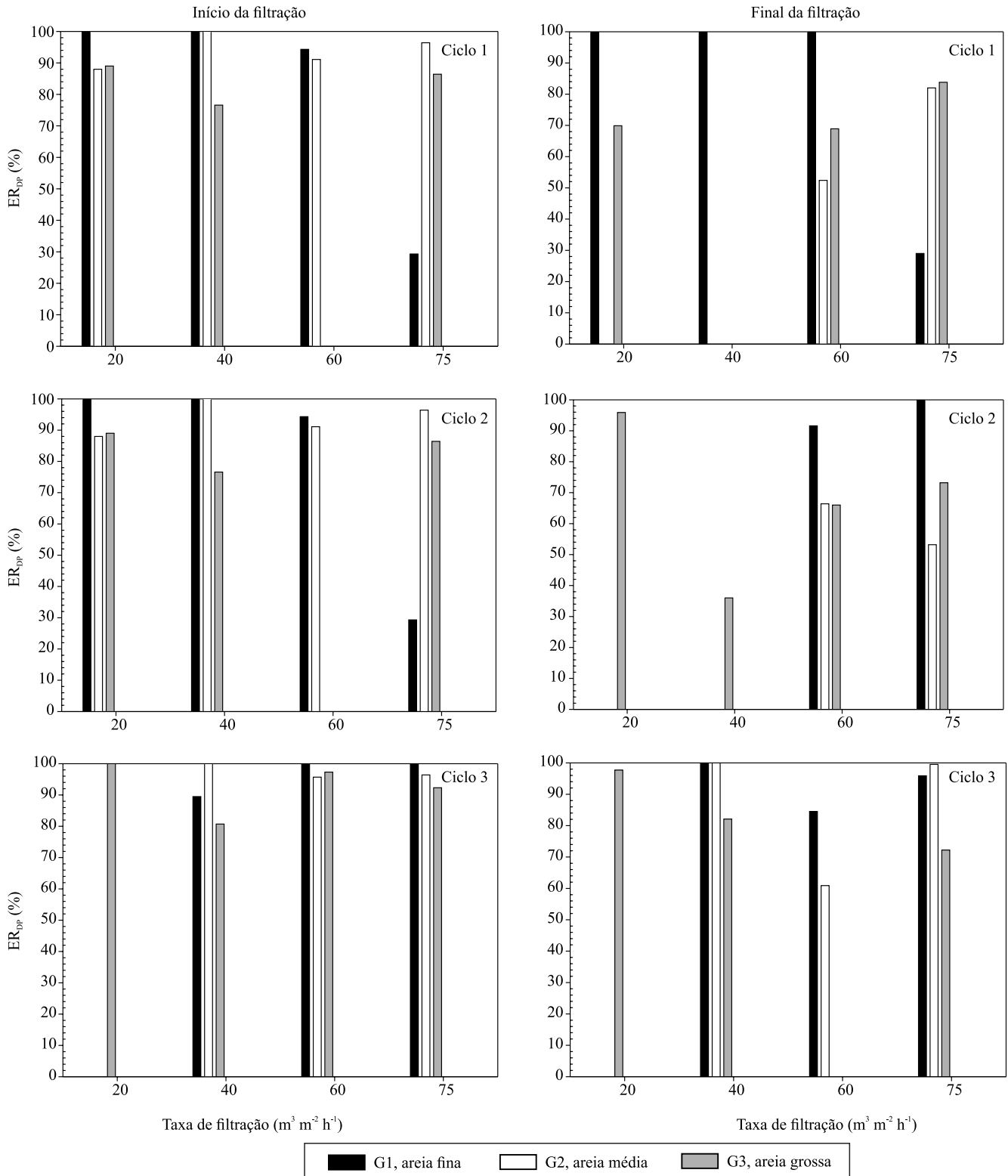
23,3% respectivamente). Para a granulometria areia média, a taxa de filtração não influenciou a eficiência de remoção, que apresentou valores superiores a 76 e 52,4% no início e no final do processo, respectivamente (Figura 4), com exceção de alguns tratamentos que apresentaram valores discrepantes: -29,3%, para G1TF75; -117,1%, para G3TF60; e -41,1%, para G3TF40. A ocorrência dos valores discrepantes pode estar associada a erros inerentes às medidas do equipamento ou simplesmente a uma dinâmica não determinística do processo de filtração.

No segundo ciclo de filtração, na faixa de areia fina, houve tendência de aumento nos valores de eficiência com o incremento da taxa de filtração (Figura 3), com base nos dados da primeira coleta (início da filtração), para todas as granulometrias de areia avaliadas. Com exceção dos tratamentos que apresentaram resultados discrepantes (68,7% para G2TF60; e 15,4% para G3TF60), aquele que proporcionou maior remoção de partículas na faixa de areia fina, com o uso da granulometria G1, foi o de taxa de filtração TF60 (80,3%); com a G2, a TF40 (84,6%); e com a G3, a TF75 (53,4%). Na análise ao final da filtração, a granulometria G1 obteve o melhor resultado com a TF60 (41,5%); já a G2 (25,9%) e a G3 (25,9%), com a TF75. Ao se analisar a retenção na faixa de diâmetro de areia média, constatou-se modificação dos valores de eficiência em função da taxa de filtração apenas com o uso da granulometria mais grossa (G3), tanto no início quanto no final do processo de filtração (Figura 4). De maneira geral, houve tendência de aumento nos valores de eficiência com o incremento da taxa de filtração, baseado nos resultados do início do processo de filtragem, com exceção do valor discrepante de G3TF60, tendo-se alcançado o maior valor com a TF75 (89,4%). No final da filtração, o comportamento diferenciou-se: houve diminuição da remoção com o aumento na taxa de filtração, e o maior valor foi atingido com o uso da TF20 (95,9%).

No início do terceiro ciclo de filtração, na faixa de diâmetro de partículas correspondente à areia fina, o aumento na taxa de filtração aumentou a remoção de partículas com diâmetro de areia fina (Figura 3). O ponto máximo de remoção para a granulometria G1 foi atingido com a taxa de filtração TF75 (91,4%); para a G2, com a TF40 (88,1%); e para a G3, com a TF60 (71,1%). Ao final da filtração, os pontos de máxima eficiência mantiveram-se inalterados para as



**Figura 3.** Eficiência de remoção ( $ER_{DP}$ ) no processo de filtração, para a faixa de diâmetro de partícula correspondente ao de areia fina ( $>60$ ), para as diferentes combinações de granulometria de areia no filtro, taxas e ciclos de filtração, no início e no fim do processo. G1, G2 e G3 referem-se, respectivamente, às granulometrias de areia fina,  $D_{10}=0,55$  mm; média,  $D_{10}=0,77$  mm; e grossa,  $D_{10}=1,04$  mm.



**Figura 4.** Eficiência de remoção (ER<sub>DP</sub>) no processo de filtração, para a faixa de diâmetro de partícula correspondente ao de areia média, para as diferentes combinações de granulometria de areia no filtro, taxas e ciclos de filtração, no início e no fim do processo. G1, G2 e G3 referem-se, respectivamente, às granulometrias de areia fina, D<sub>10</sub>=0,55 mm; média, D<sub>10</sub>=0,77 mm; e grossa, D<sub>10</sub>=1,04 mm.



granulometrias G1 (51,3% para a TF75) e G3 (14,8% para a TF60), e alteraram-se com o uso da G2, que passou da TF40 para a TF75 (50,2%). Com relação à faixa de remoção de partículas com diâmetro de areia média, no terceiro ciclo de filtração, observou-se que a taxa de filtração exerceu influência apenas com o uso da granulometria mais grossa (G3), ao final do processo de filtração (Figura 4). No geral, os valores de eficiência tenderam a diminuir com o aumento na taxa de filtração, tendo-se atingido o maior valor de remoção com a TF20 (97,7%).

Dessa forma, em todos os ciclos e taxas de filtração avaliados, no início ou no final do processo, constatou-se que a diminuição da granulometria de areia do leito filtrante proporcionou aumento na eficiência de remoção das partículas com diâmetros de areia média e fina, o que também foi relatado por Haman & Zazueta (1994).

Em relação aos ciclos de filtração, houve aumento na eficiência de remoção de partículas com diâmetro de areia fina, com o decorrer dos ciclos, para as granulometrias de areia G1 e G2, combinadas com todas as taxas de filtração avaliadas (Figura 3), com exceção dos tratamentos G1TF40 e G1TF60. Para a granulometria G3, verificou-se comportamento diferenciado, com diminuição da remoção de partículas de areia fina do primeiro para o segundo ciclo e, posteriormente, incremento dessas partículas do segundo para o terceiro ciclo.

Desse modo, o meio filtrante adquiriu propriedades capazes de aumentar a remoção de partículas correspondentes à de areia fina, ao menos entre o primeiro e o segundo ciclos. Ao final do processo de filtração, para todas as combinações de taxa de filtração e granulometria de areia avaliadas, não houve comportamento definido, tendo-se observado que, em alguns casos, houve aumento na remoção até o segundo ciclo, com posterior decréscimo; e, que, em outros casos, houve diminuição da remoção com posterior acréscimo.

No que tange a variação da remoção de partículas com diâmetro correspondente ao de areia média, observou-se que o ciclo de filtração exerceu influência apenas no final da filtração, com a utilização da G3, em que as taxas de filtração TF20 e TF40 apresentaram aumento na remoção com o decorrer dos ciclos de filtração, e as taxas TF60 e TF75, diminuição dos valores (Figura 4).

Quanto ao efeito do tempo de filtração (momento de coleta) na eficiência de remoção, a remoção de partículas com diâmetro de areia fina diminuiu com o tempo de filtração, em todas as combinações experimentais. Isso evidencia a ocorrência do desprendimento de partículas, conforme salientado por Di Bernardo & Dantas (2005). Para partículas com diâmetro de areia média, não houve variação temporal na remoção de partículas com o uso da granulometria G1 ou G2, nas duas menores taxas de filtração (TF20 e TF40). Para os tratamentos G2TF60 e G2TF75, e para todas as combinações com a granulometria G3, a remoção de partículas de areia média diminuiu com o tempo de filtração, com exceção dos tratamentos G2TF75C3, G3TF20C2, G3TF40C3, G3TF60C1 e G3TF60C2.

## Conclusões

1. O modelo de filtro de areia avaliado é efetivo na remoção de partículas compreendidas a partir do diâmetro correspondente à areia fina (>60  $\mu\text{m}$ ), e, dentro dessa faixa de remoção, a influência da taxa de filtração aumenta com a diminuição do diâmetro da partícula contida na água.

2. O incremento da taxa de filtração, associado à diminuição da granulometria de areia no filtro, aumenta a eficiência de remoção, mas acentua a perda na pressão com o tempo, o que diminui a remoção das menores partículas ao longo dos ciclos.

## Agradecimentos

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (Fapesp), pelo apoio financeiro; à Hidro Solo, pelo apoio à realização da pesquisa; e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), pela concessão de bolsa.

## Referências

- ASABE. ANSI/ASAE S539: media filters for irrigation – testing and performance reporting. St. Joseph: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 1994.
- AWADY, M.N.E.; EL BERRY, A.M.; GENAIDY, M.A.I.; ZAYTON, A.M. Mathematical model for predicting the performance of trickle irrigation system. **Irrigation and Drainage**, v.25, p.837-860, 2008.

- BORSSOI, A.L.; BOAS, M.A.V.; REISDÖRFER, M.; HERNÁNDEZ, R.H.; FOLLADOR, F.A.C. Water application uniformity and fertigation in a dripping irrigation set. **Engenharia Agrícola**, v.32, p.718-726, 2012. DOI: 10.1590/S0100-69162012000400011.
- BUCKS, D.A.; NAKAYAMA, F.S.; GILBERT, R.G. Trickle irrigation water quality and preventive maintenance. **Agricultural Water Management**, v.2, p.149-162, 1979. DOI: 10.1016/0378-3774(79)90028-3.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2.ed. São Carlos: Rima, 2005. 2v., 1565p.
- DURAN-ROS, M.; PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F.R. de. Effect of filter, emitter and location on clogging when using effluents. **Agricultural Water Management**, v.96, p.67-79, 2009. DOI: 10.1016/j.agwat.2008.06.005.
- HAMAN, D.Z.; ZAZUETA, F.S. **Media filters for trickle irrigation in Florida**. Gainesville: University of Florida, 1994. 5p. (Fact sheet AE-57).
- MESQUITA, M.; TESTEZLAF, R.; RAMIREZ, J.C.S. The effect of media bed characteristics and internal auxiliary elements on sand filter head loss. **Agricultural Water Management**, v.115, p.178-185, 2012. DOI: 10.1016/j.agwat.2012.09.003.
- PIZARRO CABELLO, F. **Riegos localizados de alta frecuencia (RLAF): goteo, microaspersión e exudación**. 3.ed. Madrid: Mundi-Prensa, 1996. 513 p.
- PUIG-BARGUÉS, J.; ARBAT, G.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F.R. Effluent particle removal by microirrigation system filters. **Spanish Journal of Agricultural Research**, v.3, p.182-191, 2005a. DOI: 10.5424/sjar/2005032-139.
- PUIG-BARGUÉS, J.; BARRAGÁN, J.; CARTAGENA, F.R. Development of equations for calculating the head loss in effluent filtration in microirrigation systems using dimensional analysis. **Biosystems Engineering**, v.92, p.383-390, 2005b. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.07.009.
- SALCEDO, J.C.; TESTEZLAF, R.; MESQUITA, M. Processo da retrolavagem em filtros de areia usados na irrigação localizada. **Engenharia Agrícola**, v.31, p.1226-1237, 2011. DOI: 10.1590/S0100-69162011000600020.
- TESTEZLAF, R. Filtros de areia aplicados à irrigação localizada: teoria e prática. **Engenharia Agrícola**, v.28, p.604-613, 2008. DOI: 10.1590/S0100-69162008000300020.

---

Recebido em 22 de outubro de 2014 e aprovado em 18 de agosto de 2015