



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO NORTE
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA**

ISABELLY BEZERRA BRAGA GOMES DE MEDEIROS

**EMPREGO DE GEOTÊXTEIS NÃOTECIDOS NA PERCOLAÇÃO EM
SOLO ARENOSO COM DISPOSIÇÃO DE ESGOTO TRATADO SOB
CONDIÇÕES ANAERÓBIAS**

**Natal
2016**

ISABELLY BEZERRA BRAGA GOMES DE MEDEIROS

**EMPREGO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS NA PERCOLAÇÃO EM
SOLO ARENOSO COM DISPOSIÇÃO DE ESGOTO TRATADO SOB
CONDIÇÕES ANAERÓBIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos
Co-orientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França

Natal

2016

UFRN / Biblioteca Central Zila Mamede
Catalogação da Publicação na Fonte

Medeiros, Isabelly Bezerra Braga Gomes de.

Emprego de geotêxteis não tecidos na percolação em solo arenoso com disposição de esgoto tratado sob condições anaeróbias / Isabelly Bezerra Braga Gomes de Medeiros. - Natal, RN, 2016.
34 f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Hélio Rodrigues dos Santos.

Coorientador: Prof. Dr. Fagner Alexandre Nunes de França.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária.

1. Colmatação - Dissertação. 2. Geotêxtil - Dissertação. 3. Infiltração - Dissertação. 4. Esgoto - Dissertação. I. Santos, Hélio Rodrigues dos. II. França, Fagner Alexandre Nunes de. III. Título.

RN/UF/BCZM

CDU 628.33

ISABELLY BEZERRA BRAGA GOMES DE MEDEIROS

**EMPREGO DE GEOTÊXTEIS NÃO TECIDOS NA PERCOLAÇÃO EM
SOLO ARENOSO COM DISPOSIÇÃO DE ESGOTO TRATADO SOB
CONDIÇÕES ANAERÓBIAS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação, em Engenharia Sanitária, da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Sanitária.

BANCA EXAMINADORA

Dr. Hélio Rodrigues dos Santos – Orientador

Dr. Fagner Alexandre Nunes de França – Co-orientador

Dr. André Luis Calado Araújo – Examinador UFRN

Dra. Juliana Delgado Tinôco – Examinadora Externa

Natal, 02 de Fevereiro de 2016.

AGRADECIMENTOS

A Deus;

Aos meus pais, pelo apoio incondicional e pelo constante incentivo;

O meu esposo Camargo, por sempre estar ao meu lado, encorajando-me a seguir em frente. Muito obrigado pelo amor, paciência e compreensão;

Ao meu orientador, Hélio Rodrigues, pela orientação neste trabalho e por dividir comigo parte de seu precioso conhecimento;

Ao professor Fagner França, pela co-orientação e disponibilidade em me ajudar sempre que foi necessário;

À Carolina Tavares por toda a ajuda na realização e concepção do trabalho;

Aos bolsistas Maiara e Lucas que participaram na realização das análises e as quais tenho grande apreço;

Aos meus amigos de curso, especialmente Josy, Xaila, Radmila e Maquinhos, pelos dias de estudo, pelas conversas engraçadas e pela amizade;

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior (CAPES) pela bolsa concedida;

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN);

A todos os professores e funcionários do LARHISA;

A todos os envolvidos no laboratório de Solos da UFRN;

A Ban, funcionário da ETE da UFRN;

A todos que de alguma forma contribuíram com esta dissertação.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Configuração experimental dos ensaios de percolação.	15
Figura 2 - Detalhe das colunas de percolação	17
Figura 3- Curva da Distribuição Granulométrica da areia	19
Figura 4– Condutividade hidráulica ao longo do tempo para percolação de AP e TS+FAn.....	24
Figura 5 – Variação da redução da condutividade hidráulica em função do tempo antes e após a substituição dos geotêxteis	26
Figura 6 – Eficiência de remoção de SST, SSV e SSF nas colunas de percolação..	27
Figura 7 – Relação de SST por volume de afluente infiltrado com a condutividade hidráulica.....	27
Figura 8 – Relação dos ST removidos e volume de esgoto tratado infiltrado	28
Figura 9 - Teor de matéria orgânica por volume infiltrado ao longo das colunas de percolação no 38 ^a e 52 ^a dia.	29
Figura 10 - Teor de matéria orgânica por volume infiltrado em cada coluna de percolação no 38 ^a e 52 ^a dia.	30

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Planejamento experimental para os ensaios de percolação com carga constante.....	16
Tabela 2: Índices físicos da areia.....	18
Tabela 3: Propriedades dos geotêxteis utilizados nos experimentos	20
Tabela 5: Análises laboratoriais realizadas	22

RESUMO

A disposição final no solo do esgoto tratado em sistemas descentralizados cresce como alternativa frente à inexistência de esgotamento sanitário que possibilite a disposição final apropriada aos esgotos domésticos. Além disso, a praticidade construtiva, proximidade com o sistema de tratamento e inexistência de legislações específicas que regulem padrões de lançamento contribuem para o aumento do uso dessa alternativa. Todavia, a redução acelerada da capacidade de infiltração do solo devido à colmatação tem causado o transbordamento desses dispositivos, reduzindo a vida útil dos mesmos. A recuperação desses sistemas de infiltração, após a ocorrência de sua colmatação, é um grande desafio. Além de árduas, as limpezas desse tipo de dispositivo normalmente são ineficientes, tornando o processo impraticável em muitos casos. Dessa forma, a utilização de geotêxteis não tecidos surge como uma alternativa que pode contribuir para a eficiência e durabilidade de dispositivos de infiltração. O recobrimento do solo por esse material pode possibilitar a conservação e renovação da capacidade de infiltração do solo, uma vez que a retenção de material sólido pelo geotêxtil pode reduzir a colmatação no solo. Desta forma, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o uso de geotêxteis não tecidos no prolongamento da vida útil de dispositivos de percolação em solos arenosos, com disposição de esgoto tratado, sob condições anaeróbicas. Para isso, foram monitoradas três unidades piloto de percolação (colunas de infiltração) em triplicata (filtro-piloto de areia recoberto com geotêxtil não tecido de 130 g/m², filtro-piloto de areia recoberto com geotêxtil não tecido de 300 g/m² e filtro-piloto de areia sem geotêxtil), alimentadas pelo efluente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico seguido de filtro anaeróbio. Configurações de filtros-piloto em duplicata, alimentados com água potável, também foram testadas a fim de se verificar a influência da perda de carga dos geotêxteis na condutividade hidráulica. Os sistemas foram alimentados continuamente, de maneira que era sempre mantida uma carga hidráulica constante de 10 cm sobre as colunas de percolação, induzindo-as a condições anaeróbicas. O experimento foi operado por 52 dias, porém, no 38^a dia, os geotêxteis de duas colunas de cada triplicata foram substituídos. Análises de condutividade hidráulica e físico-químicas (turbidez, sólidos, nitrogênio amoniacal e orgânico, nitrato, fósforo e DQO) foram realizadas semanalmente no afluente e efluente das configurações. No término de cada etapa do experimento (38^a dia e 52^a dia), o solo de preenchimento das colunas de percolação desativadas foi analisado para obtenção do teor de matéria orgânica. Concluiu-se que os geotêxteis retiveram parcela considerável dos sólidos presentes no afluente, principalmente o de 300 g/m², reduzindo a colmatação no solo das colunas de percolação. Entretanto, o geossintético causou uma perda de carga considerável, reduzindo os valores de condutividade hidráulica dos sistemas. Além disso, se evidenciou que a matéria orgânica se acumula principalmente na superfície do solo e logo abaixo dela. Os geotêxteis não se mostraram como fator de interferência na eficiência de remoção de nutrientes, DQO e turbidez.

Palavras-chave: Colmatação; Geotêxteis; Infiltração; Esgoto.

ABSTRACT

The final disposal of treated sewage in the soil by decentralized systems grows as an alternative in front to the lack of sewage that enables the appropriate final disposal of domestic sewage. Moreover, the constructive practicality, the proximity with the treatment system and the lack of specific laws to regulate the discharge standards, contribute to the increased use of these systems. However, the rapid depletion of the soil due to clogging has caused the overflow of these devices, reducing their lifespan. The recovery of these infiltration systems, after the occurrence of their clogging, is a major challenge. In addition to difficult, the cleaning of this type of device is usually inefficient, making the process impractical in many cases. Thus, the use of non-woven geotextile is an alternative which can contribute to the efficiency and durability of infiltration devices. The soil cover by such material can allow the maintenance and renewal of soil infiltration capacity since the retention of solid material through the geotextile can reduce clogging in the soil, as well as other benefits. So, this study aims to evaluate the use of non-woven geotextiles in extending the lifespan of percolation devices in sandy soils, with treated sewage release, under anaerobic conditions. For this, there were monitored three percolation pilot units (infiltration columns) in triplicate (filter + sand pilot covered with geotextile 130 g/m², filter + sand pilot covered with geotextile 300 g/m² and filter + sand pilot without geotextile), fed with the effluent of a treatment system consisting of a septic tank followed by anaerobic filter. Some settings of filter + pilot in duplicate, fed by fresh water, were also tested in order to verify the influence of pressure drop of geotextiles to conduct water. The systems were continuously fed in the way that it was always maintained constant hydraulic load of 10cm above the percolation columns, inducing them to anaerobic conditions. The experiment was operated for 52 days; however, in the 38th day, the geotextiles of two columns of each triplicate were replaced. Analysis of water conduction and physicochemical (turbidity, solids, ammonia, organic nitrogen, nitrate, phosphorus and COD) were held weekly in the affluent and effluent of the columns. At the end of each stage of the experiment (38th and 52th day), the soil used to fill the percolation columns that were disabled was analyzed to obtain the organic matter content. It was concluded that geotextiles retained considerable portion of the solids present in the affluent, especially the 300 g/m², reducing clogging in the soil of the percolation columns. However, geosynthetic caused a considerable pressure drop, reducing the values of hydraulic conduction of the systems. Furthermore, it became clear that the organic matter accumulates mainly in the surface of the soil and below it. The geotextiles did not appear as a factor with interference in the efficiency of nutrient removal, COD and turbidity.

Keywords: Clogging; Geotextiles; Wastewater infiltration on soil.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	11
2. MATERIAL E MÉTODOS	15
2.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL	15
2.2 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS	17
2.2.1 Solo de preenchimento das colunas	18
2.2.2 Geotêxteis não tecidos	20
2.2.3 Afluente TS+FA _n e AP	20
2.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E MÉTODOS ANALÍTICOS	21
2.3.1 Ensaios de condutividade hidráulica	21
2.3.3 Análise do solo	22
2.4 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS	22
3. RESULTADOS E DISCUSSÃO	24
3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA	24
3.2 REMOÇÃO DE SÓLIDOS	26
3.3 ANÁLISE DO SOLO	28
4. CONCLUSÃO	31
REFERÊNCIAS	32

1. INTRODUÇÃO

O tanque séptico (TS) é o mais conhecido e utilizado dentre os sistemas anaeróbios empregados no tratamento descentralizado de esgoto doméstico, devido a suas características favoráveis, como baixo custo, simplicidade operacional, baixa demanda de área e baixa produção de sólidos. Entretanto, esse sistema possui suas limitações, como baixa eficiência na remoção de matéria orgânica, microrganismos patogênicos e nutrientes, mesmo quando operado com tempo de detenção hidráulico elevado (MASSOUD *et al.*, 2009).

A disposição de efluentes de TS no solo é uma opção amplamente utilizada. Essa prática, contudo, pode contaminar o solo e as águas. O solo atua como um filtro, depurando os resíduos nele lançados, no entanto, essa capacidade de depuração pode ser alterada em função do efeito cumulativo da deposição dos diversos elementos ainda presentes no efluente tratado. A migração dos poluentes através do solo, para as águas superficiais e subterrâneas, se constitui em uma ameaça para a qualidade dos recursos hídricos utilizados em abastecimento público, industrial, agrícola, comercial, lazer e serviços (CASARINI *et al.*, 2001).

Os mecanismos que envolvem o processo de infiltração de esgotos tratados, não são facilmente compreendidos. Pell e Nyberg (1989) afirmaram que o bom resultado da infiltração é devido ao desenvolvimento da população microbiana nos interstícios da areia, capaz de remover o material orgânico poluente. Em contrapartida, Pedescoll *et al.* (2011) complementam que não só o processo biológico é capaz de remover os contaminantes de esgotos domésticos, mas também processos físicos e químicos. Assim, a estimativa de parâmetros de projeto para dispositivos de infiltração torna-se complexa e pouco compreendida.

A diminuição dos valores de condutividade hidráulica do solo durante a infiltração de esgotos tratados está associada à obstrução física, decorrente do aporte de sólidos em suspensão e dos coloidais (PELL; NYBERG, 1989); biológica, em virtude do desenvolvimento da população microbiana nas camadas de solo (BAVEYE *et al.*, 1998) e devido à deposição e acumulação de precipitados (PEDESCOLL *et al.*, 2011).

Essa obstrução das camadas do solo configura-se como a colmatção do meio filtrante, ocasionando o retardo no fluxo do líquido e diminuindo a eficiência

da infiltração, independentemente do tipo de solo (SOLEIMANI et al., 2009). Desta forma, a camada colmatante é o principal fator que regula o fluxo em sistemas de disposição no solo de esgoto tratado (BEAL et al., 2006).

Em areias, a condutividade hidráulica é alta no início da disposição do esgoto tratado, permitindo que uma maior carga orgânica se acumule no solo. Já em solos de baixa permeabilidade, como argilas, a baixa capacidade de infiltração inicial determina uma taxa de aplicação reduzida (BEAL et al., 2006).

Rolland et al. (2009) ressaltam que a distribuição de tamanho das partículas de areia é um parâmetro importante na determinação da eficiência do tratamento, bem como a confiabilidade e durabilidade do sistema. Isso porque problemas com colmatção podem ocorrer em sistemas de disposição do solo, devido ao excesso de biofilme desenvolvido nos interstícios e à carga orgânica aplicada ao sistema.

A camada colmatante se desenvolve com maior intensidade na superfície do solo e logo abaixo dela. Essa região passa a apresentar cor escura, alto acúmulo de matéria orgânica, elevada saturação e alta densidade microbiana (TOMARAS et al., 2009). A espessura dessa camada, segundo Leverenz et al. (2009) varia em função de vários fatores, dentre os quais: a idade e projeto do sistema de disposição, qualidade do esgoto tratado lançado, forma como o efluente do esgoto tratado é aplicado no solo, permitindo ou não a aeração do mesmo, taxas de carregamento e características do solo.

Considerando a aplicação de esgoto no terreno natural como um método de tratamento, além de disposição final, a colmatção do solo é um fenômeno que pode, até certo ponto, contribuir para a eficiência de processos físico-químicos e bioquímicos na zona de obstrução e na camada insaturada logo abaixo dela. Entretanto, a colmatção intensa pode levar à disfunção hidráulica e condições anóxicas ou anaeróbias no solo (PAVELIC et al., 2011).

A disposição final no solo do esgoto tratado em sistemas descentralizados cresce como alternativa frente à insuficiente extensão da rede pública de esgotamento sanitário que possibilite a disposição final centralizada aos esgotos domésticos. Além disso, a praticidade construtiva, proximidade com o sistema de tratamento e inexistência de legislações específicas que regulem padrões de lançamento contribuem para o aumento do uso desses sistemas. Todavia, o

rápido esgotamento do solo, devido à colmatção, tem causado o transbordamento desses dispositivos, reduzindo a vida útil dos mesmos.

Um dos grandes desafios na concepção de sistemas de infiltração apresentados na literatura especializada é a avaliação do melhor nível de pré-tratamento de esgoto antes do lançamento no solo. Ademais, observações conflitantes foram relatadas com relação à interferência dos sólidos em suspensão presentes no esgoto tratado e a condutividade hidráulica do solo (BEAL et al., 2006) e a influência da carga hidráulica disponível nas taxas de infiltração do solo (LEVERENZ et al., 2009).

A recuperação desses sistemas de infiltração, após a ocorrência de sua colmatção, também é considerada um grande desafio. Além de difíceis, as limpezas desse tipo de dispositivo normalmente são ineficientes, tornando o processo impraticável em muitos casos. Tais dificuldades levam à desativação dos sistemas colmatados e construção de novas unidades, demandando novas áreas.

Dessa forma, a utilização de geotêxteis não tecidos surge como uma alternativa que pode contribuir para maior eficiência e durabilidade de dispositivos de infiltração. O recobrimento do solo por esse material pode possibilitar a conservação e renovação da capacidade de infiltração do solo uma vez que, a retenção de material sólido pelo geotêxtil pode reduzir a colmatção no solo.

Os geotêxteis são elementos que possuem alta permeabilidade e permitem a passagem de fluidos através de sua estrutura, retendo as partículas sólidas, sendo utilizados, portanto, principalmente como dispositivos filtrantes (DAS, 2006). O crescimento de microrganismos e acumulação de material orgânico em geotêxteis foi observada por Mlynarek et al., (1990) em filtros que protegem sistemas de coleta de chorume em aterros sanitários. Yaman et al., (2005) compararam o desempenho de geotêxteis tecidos e não tecidos com relação à infiltração de esgoto tratado e chegaram à conclusão de que os não tecidos são ainda mais eficientes, visto que exercem sua função provocando menor perda de carga no sistema.

Assim, em vez de buscar pré-tratamentos que reduzam a colmatção do solo e preservem por mais tempo a integridade destes, a utilização do geossintético surge como uma alternativa de prolongar a vida útil dos dispositivos de infiltração. Uma das principais vantagens do uso do geotêxtil é a possibilidade

de substituição do material e recuperação do sistema, além do baixo custo da operação. Desta forma, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar o uso de geotêxteis não tecidos no prolongamento da vida útil de dispositivos de percolação em solos arenosos, com disposição de esgoto tratado, sob condições anaeróbicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

Para avaliar a aplicabilidade de geotêxteis na preservação a capacidade de infiltração de esgoto em solos arenosos, foram construídas unidades piloto de percolação (colunas de infiltração) contendo amostras de um solo franco arenoso, que foram alimentadas com o efluente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico seguido de filtro anaeróbio (TS+FA). Foram monitoradas três configurações de filtros-piloto, cada uma em triplicata: filtro de areia recoberto com geotêxtil não-tecido de 130 g/m² (G130); filtro de areia recoberto com geotêxtil não-tecido de 300 g/m² (G300); e filtro de areia sem geotêxtil (SG).

Com o objetivo de verificar a influência da perda de carga dos geotêxteis na condutividade hidráulica dos sistemas, foram também monitoradas as três configurações de filtros-piloto alimentados com água potável (AP), proveniente de um poço profundo, sem adição de cloro ou qualquer desinfetante, sendo que cada coluna foi operada em duplicata (Figura 1). Os sistemas eram alimentados continuamente, de maneira que era sempre mantida uma carga hidráulica constante de 10 cm sobre todas as colunas de percolação.

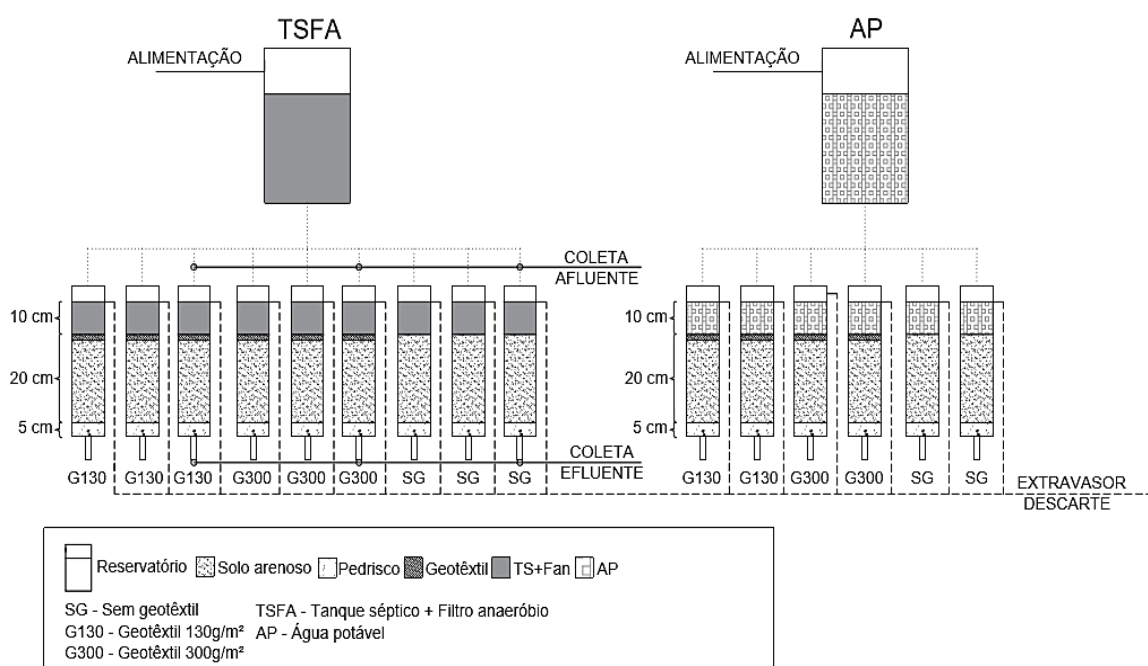


Figura 1 – Configuração experimental dos ensaios de percolação.

Ensaio de condutividade hidráulica com carga constante foram realizados semanalmente nos sistemas de percolação. Com a mesma frequência, análise laboratorial de sólidos também foi efetuada com os afluentes e efluentes (TS+FAn e AP) das colunas de percolação (Tabela 1). As coletas foram realizadas nas extremidades inferiores das configurações e mangueiras de alimentação dos dispositivos de percolação (Figura 1).

Tabela 1: Planejamento experimental para os ensaios de percolação com carga constante

Afluentes	CONDIÇÕES DE ENSAIO	Parâmetros monitorados
TS+FAn– Efluente tanque séptico + filtro anaeróbio.	CARGA: Constante de 10cm RECOBRIMENTO DO SOLO: • Geotêxtil não tecido 130 g/m ² • Geotêxtil não tecido 300 g/m ² • Sem recobrimento	Sólidos (ST, STV, STF, SST, SSV, SSF, SDT, SDV e SDF)*
AP – Água potável provinda de poço profundo		

*ST – Sólidos Totais; STV – Sólidos Totais Voláteis; STF – Sólidos Totais Fixos; SST – Sólidos Suspensos Totais; SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; SSF – Sólidos Suspensos Fixos; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis; SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos.

No 38^a dia de experimento, quando a condutividade hidráulica dos filtros-piloto G130 e G300 atingiram respectivamente 0,07 m/dia e 0,04 m/dia e já não era mais possível tecnicamente a medição da condutividade hidráulica, foi iniciado o procedimento de substituição dos geotêxteis, em duas das configurações de cada repetição, abastecidas com TS+FAn. Assim, após a troca, o sistema passou a funcionar em duplicata até o 52^a dia.

Para substituição dos geotêxteis, a extremidade inferior das configurações foi vedada, de forma a manter o solo das colunas saturado com o afluente, não havendo reaeração. O procedimento de troca durou 5 dias tendo em vista a abertura das colunas demandar tempo. Desta forma, o sistema voltou a funcionar no 43^a dia.

Após a desativação das colunas, tanto no 38º dia (uma coluna de cada triplicata) como no 52º dia (duas colunas de cada triplicata), foi efetuada a análise dos sólidos retidos nos meios filtrantes das colunas através do ensaio de quantificação de matéria orgânica no o solo de preenchimento das mesmas.

2.2 INSTALAÇÕES EXPERIMENTAIS

As colunas aplicadas ao experimento foram confeccionadas em material transparente (acrílico), para que fosse possível realizar a análise visual da colmatação do solo. Durante a operação, todas as colunas foram envolvidas com papel alumínio, de forma a restringir a incidência de insolação e possível desenvolvimento de algas e outros seres fototróficos.

As colunas de percolação possuíam seção quadrada, com dimensões de 4,5 cm e altura útil de 35 cm, dividida em duas partes interligadas por flanges (Figura 2). O preenchimento de uma parcela da coluna com pedrisco contribuiu na distribuição uniforme do escoamento. O fluxo era vertical para baixo com saída na extremidade inferior das colunas.

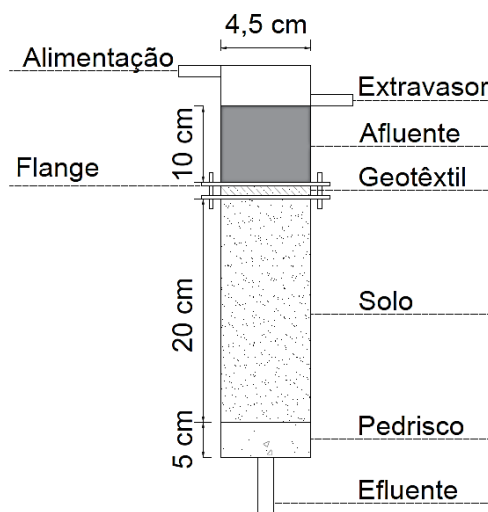


Figura 2 - Detalhe das colunas de percolação

As dimensões das colunas foram projetadas em uma escala adequada para minimizar os requisitos de volume de alimentação, mas simultaneamente

garantir que a influência dos efeitos de parede fosse desprezível, conforme sugerido por Smith e Dillon (1997).

O experimento foi montado em um abrigo coberto com lona escura, em local próximo aos sistemas de tratamento dos afluentes (TS+FAn e AP). Desta forma, a alimentação das colunas era realizada continuamente, induzindo o estabelecimento de condições anaeróbias em toda a sua extensão.

O reservatório, que alimentava o sistema de percolação com afluente TS+FAn, foi abastecido através de bomba centrífuga, que funcionava vinte e quatro horas por dia e bombeava o efluente final do tratamento e recalava para o reservatório de armazenamento, de onde este seguia para a alimentação, por gravidade, das colunas. Para o afluente AP, foi utilizada uma mangueira para alimentar o reservatório, conectada a um ponto de torneira de jardim.

2.2.1 Solo de preenchimento das colunas

O solo utilizado para o experimento foi uma areia com granulometria média uniforme (Tabela 2 e Figura 3), originária de sedimentos de Dunas. As amostras tipo deformadas foram coletadas na Universidade Federal do Rio Grande do Norte, que fica nas imediações do Parque das Dunas de Natal/RN.

A coleta foi realizada utilizando sacos plásticos para conservar o teor de umidade de campo. No laboratório, o solo secou naturalmente e foi peneirado (abertura da peneira: 2 mm), de forma a eliminar folhas, pedras ou qualquer constituinte que não fizesse parte do mesmo. A caracterização física do solo foi realizada previamente por FONTOURA (2015).

Tabela 2: Índices físicos da areia

ÍNDICES FÍSICOS	VALORES
Massa específica dos sólidos	2,62 g/cm ³
Coeficiente de uniformidade, C_u	1,861
Coeficiente de Curvatura, C_c	0,971
Diâmetro efetivo, D_{10}	0,153
Índice de vazios mínimo, $e_{\min}$	0,59
Índice de vazios máximo, $e_{\max}$	0,80

FONTE: FONTOURA (2015)

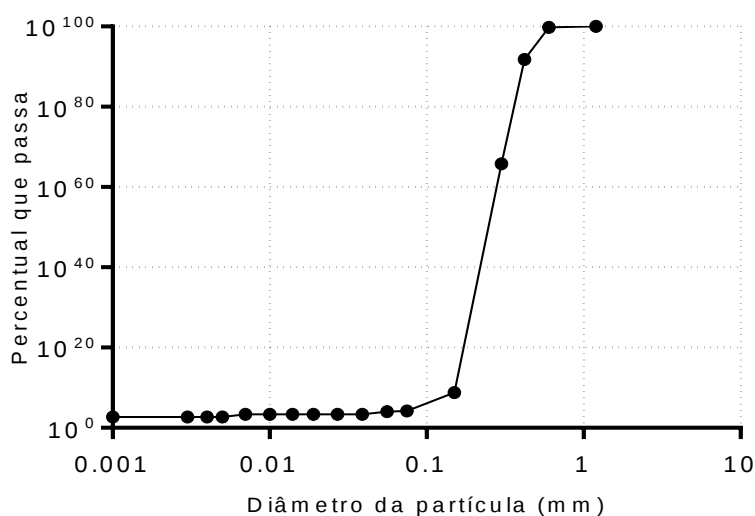


Figura 3- Curva da Distribuição Granulométrica da areia
 FONTE: FONTOURA (2015)

A massa de solo seca a ser inserida na coluna foi determinada a partir do índice de vazios e da massa específica dos sólidos (Tabela 2). O valor do índice de vazios utilizado foi determinado pela Equação (1), considerando a densidade relativa de compactação igual a 70%, tendo em vista que esse valor aproxima-se do estado natural da areia compactada (DAS, 2006).

$$e = \text{densidade relativa} \cdot (e_{\text{min}} - e_{\text{max}}) + e_{\text{max}} \quad (1)$$

A massa de solo foi introduzida em cada coluna de forma fracionada (cinco camadas de quatro centímetros cada), tendo em vista que o solo estava seco e era necessária a compactação em camadas para obtenção da densidade relativa desejada. Em cada porção de solo adicionada um soquete de madeira com dimensões compatíveis com a seção transversal das colunas auxiliava na compactação do solo.

Colunas que obtiveram valores de condutividade hidráulica com variação de 15% com relação às demais de mesma configuração foram montadas novamente e testadas até que sua condutividade estivesse inserida dentro do limite estabelecido, conforme o procedimento sugerido por PAVELIC et al. (2011).

2.2.2 Geotêxteis não tecidos

Duas especificações de geotêxteis não tecidos foram utilizadas no experimento: 130g/m² (G130) e 300g/m² (G300). A decisão de testar diferentes gramaturas foi induzida pelos seguintes questionamentos: observação de qual gramatura interferia mais nas cargas hidráulicas do sistema, influência da espessura do geotêxtil no local de formação do biofilme, resistência do material as deformações e intempéries, praticidade e o custo de instalação.

Os geotêxteis utilizados possuem fibras de alta tenacidade, compostas de poliéster e polipropileno além de alta resistência a ataques químicos e biológicos. Suas propriedades se diferenciam principalmente nos aspectos hidráulicos e mecânicos (Tabela 3).

Tabela 3: Propriedades dos geotêxteis utilizados nos experimentos

PROPRIEDADES	G130	G300
Resistência a Tração (kN)	7	16
Resistência ao rasgo trapezoidal (N)	160	340
Resistência ao punçionamento (kN)	1,20	2,60
Abertura média de filtração (µm)	160	110
Permeabilidade normal (cm/s)	0,4	0,4

FONTE: OBER (2015)

O geotêxtil foi instalado na superfície do solo e preso por flanges que conectavam a parte inferior da coluna (solo + pedrisco) e a superior (carga hidráulica + extravasamento) (Figura 2). Para evitar vazamentos, uma camada de silicone foi aplicada externamente no flange.

2.2.3 Afluente TS+FAn e AP

O afluente TS+FAn utilizado para a alimentação das colunas era proveniente de um sistema de tratamento composto por tanque séptico com duas câmaras em série seguido por filtro anaeróbio. O sistema recebia esgoto com características essencialmente domésticas, coletado das residências

universitárias, do departamento de educação física, do restaurante universitário e do pousou universitário da Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

Com relação ao afluente AP, o mesmo provinha de um reservatório de distribuição, abastecido por um poço profundo também localizado no campus da UFRN. O aquífero Barreiras é o responsável pelo abastecimento de todos os poços da universidade.

2.3 PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS E MÉTODOS ANALÍTICOS

2.3.1 Ensaios de condutividade hidráulica

Os ensaios de condutividade hidráulica foram realizados com carga constante em todas as colunas de solo. Foi medido, o tempo necessário para a coleta de determinado volume do efluente e, conhecendo fatores como a altura da coluna de solo, a carga hidráulica sobre o solo e a área da seção da coluna, se utilizou da Equação (2) para o cálculo da condutividade hidráulica (DAS, 2006):

$$k = \frac{V \times L \times 86.400}{t \times A \times (L+h) \times 100} \quad (2)$$

Onde:

K – condutividade hidráulica (m/dia)

V – volume coletado (ml)

L – altura da coluna de solo (cm)

t – tempo necessário para coletar V (s)

A – área da seção da coluna (cm²)

h – carga hidráulica sobre o solo (cm)

2.3.2 Análises laboratoriais

A análise física laboratorial da concentração de sólidos foi realizada semanalmente nos afluentes e nos efluentes das colunas de percolação alimentados por TS+FA_n e AP. O método utilizado na análise física segue as prescrições do Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (APHA *et al.*, 2012) e está apresentado na Tabela 5.

Tabela 4: Análises laboratoriais realizadas

PARÂMETRO	MÉTODO	REFERÊNCIA	PROTOCOLO
Sólidos (ST, STV, STF, SST, SSV, SSF, SDT, SDV e SDF)*	Gravimetria	(APHA et al., 2012)	2540 - B,C,D,E

*ST – Sólidos Totais; STV – Sólidos Totais Voláteis; STF – Sólidos Totais Fixos; SST – Sólidos Suspensos Totais; SSV – Sólidos Suspensos Voláteis; SSF – Sólidos Suspensos Fixos; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; SDV – Sólidos Dissolvidos Voláteis; SDF – Sólidos Dissolvidos Fixos.

2.3.3 Análise do solo

No término da utilização de cada coluna de percolação, tanto antes como após a substituição do geotêxtil (38^a e 52^a dia), o solo de preenchimento das mesmas foi analisado para obtenção do teor de matéria orgânica ao longo da altura das colunas.

Para tanto, a coluna foi fracionada em estratos de 2,5 cm de altura, obtendo-se oito camadas, nas quais foram quantificados os teores de material orgânico e inorgânico. Desta forma, foi possível verificar em qual trecho da coluna houve maior retenção de partículas, além de conhecer a natureza deste material (orgânico ou inorgânico).

O método da calcinação foi utilizado para determinação do teor de matéria orgânica em cada camada de solo. Inicialmente as amostras foram secas por 24 horas a 105°C, pesadas (P_0) e levadas a mufla por 5 horas à 550°C. Posteriormente, cada amostra foi pesada novamente (P_1) e a diferença entre o peso inicial e o final ($P_0 - P_1$) correspondeu ao teor de matéria orgânica (adaptado de DAVIES, 1974).

2.4 TRATAMENTOS ESTATÍSTICOS

Realizou-se a análise estatística descritiva dos dados coletados, obtendo-se médias aritméticas das triplicatas para todos os parâmetros físico-químicos analisados. Foi realizada a análise de variâncias (ANOVA) a fim de se avaliar estatisticamente as variáveis (parâmetros analisados) que apresentaram maior efeito com relação ao uso dos geotêxteis nas colunas de percolação.

Foi realizado o teste t de Student pareado de forma a comparar o teor de matéria orgânica na primeira análise do solo (38^a dia) e na segunda (52^a dia), de forma a verificar a significância estatística entre elas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 CONDUTIVIDADE HIDRÁULICA

Nas colunas que receberam o efluente do TS+FAn, a condutividade hidráulica (Figura 4), apresentou diferenças significativas ($p < 0,05$), entre SG e G300, a partir do 7^a dia de experimento até o 38^a (antes da substituição dos geotêxteis), quando testadas dia à dia. G130 também mostrou diferenças com relação à SG, do 24^a ao 38^a dia. Já G130 e G300 foram estatisticamente diferentes apenas nos 31^a e 38^a dias. O processo de colmatação é evidente nessas colunas pela redução da condutividade hidráulica ao longo do tempo.

Por outro lado, nas colunas SG, G130 e G300, as quais foram alimentadas por água potável, observaram-se diferenças estatisticamente significativas ($p < 0,05$) na condutividade hidráulica nos 52 dias de experimento (Figura 4). Nesse caso, a condutividade hidráulica reduz com o tempo, tendendo assintoticamente a um valor constante.

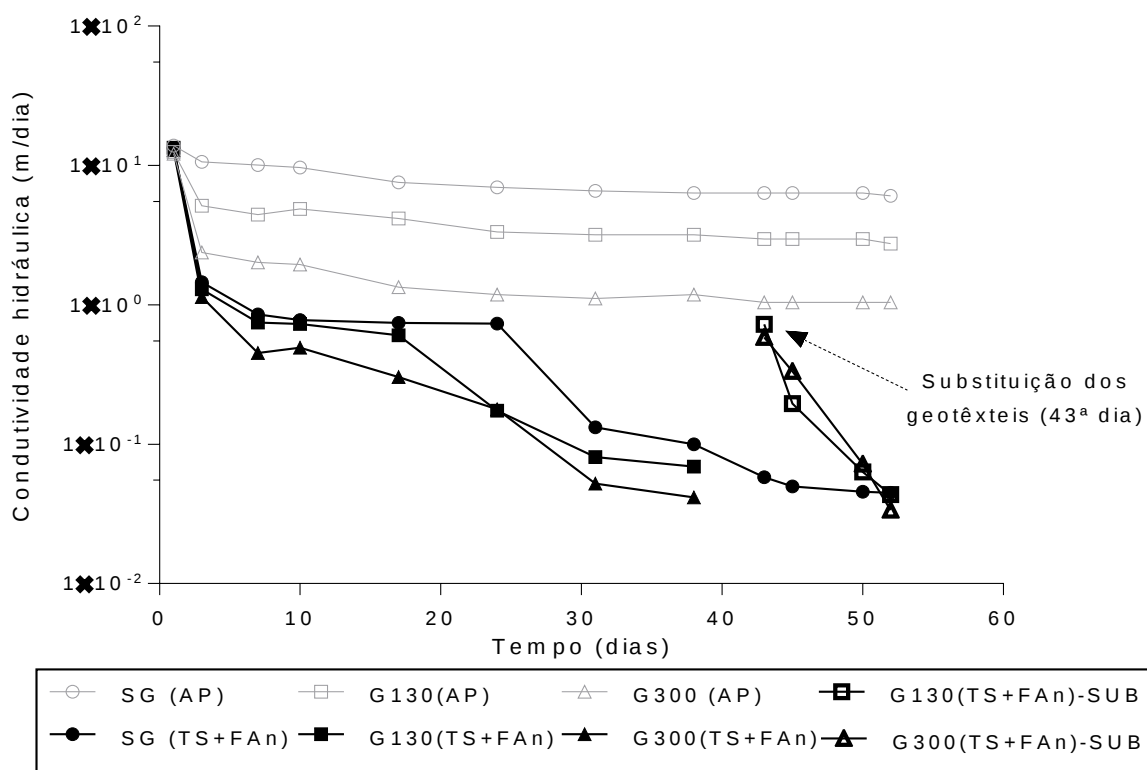


Figura 4— Condutividade hidráulica ao longo do tempo para percolação de AP e TS+FAn

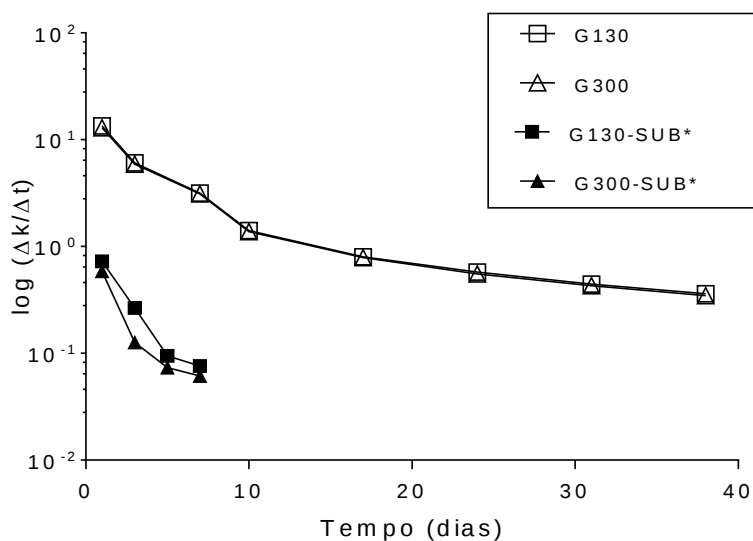
A diferença na condutividade hidráulica entre as colunas nas quais percolava água potável caracteriza-se pela perda de carga provocada pelo geotêxtil. Essa perda de carga também interferiu nas configurações que receberam o efluente do TS+FAn, sendo a G300 a mais afetada por esse fenômeno.

A redução da condutividade hidráulica na percolação de TS+FAn ocorreu devido à redução do volume de vazios no solo, ocupados pelos sólidos retidos nas colunas. Isso porque a condutividade hidráulica depende da existência de vazios pelos quais o líquido pode fluir, e a ocupação desses espaços reduziu a capacidade de infiltração do solo.

A condutividade hidráulica após a substituição dos geotêxteis nas colunas nas quais percolava o efluente do TS+FAn mostrou um aumento significativo ($p < 0,0001$) em seus valores com relação aos imediatamente antes da troca, para ambas as configurações (G130 e G300), melhorando a capacidade de infiltração do sistema (Figura 04). Houve uma diferença significativa também, entre a condutividade hidráulica em SG e as colunas com o novo geotêxtil durante sete dias após a substituição.

A recuperação da capacidade de infiltração dos sistemas após a substituição dos geotêxteis ocorreu pelo fato do material novo conter uma quantidade menor de partículas retidas em comparação ao que foi removido. Isso permitiu uma menor perda de carga e consequentemente aumento nos valores de condutividade hidráulica.

No entanto, a melhora no potencial de infiltração reduziu rapidamente, e a condutividade hidráulica atingiu em poucos dias, valores inferiores àqueles que antecederam a troca do geossintético. A análise entre a variação da condutividade hidráulica em função da variação do tempo ($\frac{\Delta k}{\Delta t}$) (Figura 5) mostra que a capacidade de infiltração dos sistemas reduziu de forma mais rápida com o novo geotêxtil. Tal fato pode ser justificado pela colmatação parcial que já havia ocorrido na areia.



*SUB - Geotêxtil após substituição

Figura 5 – Variação da redução da condutividade hidráulica em função do tempo antes e após a substituição dos geotêxteis

A redução da condutividade hidráulica nas colunas que percolaram esgoto tratado, sob condições de anaerobiose, ocorreu de forma acelerada, assim como em estudos desenvolvidos por LEVERENZ et al. (2009) e PAVELIC et al. (2011), em que esgoto tratado foi disposto em solos submetidos a condições anaeróbias. OLIVEIRA et al. (2013) e BEAL et al. (2006) também analisaram a infiltração no solo de esgoto previamente tratado, através de colunas de percolação sem o uso de geotêxtil, com a aplicação do afluente efetuado em bateladas e provindo de um tratamento aeróbio. Em comparação ao presente experimento, o valor da condutividade hidráulica atingida nos trabalhos citados foi muito superior, indicando estado mais brando de colmatção do sistema. Assim, a presença de oxigênio dissolvido permite a proliferação de uma biomassa aeróbia, que degrada matéria orgânica de forma mais rápida.

3.2 REMOÇÃO DE SÓLIDOS

A eficiência de remoção de SST nas colunas G300 (Figura 6) foi significativa ($p < 0,05$) em relação às demais configurações, confirmando que o geotêxtil de maior gramatura retém uma maior parcela de sólidos.

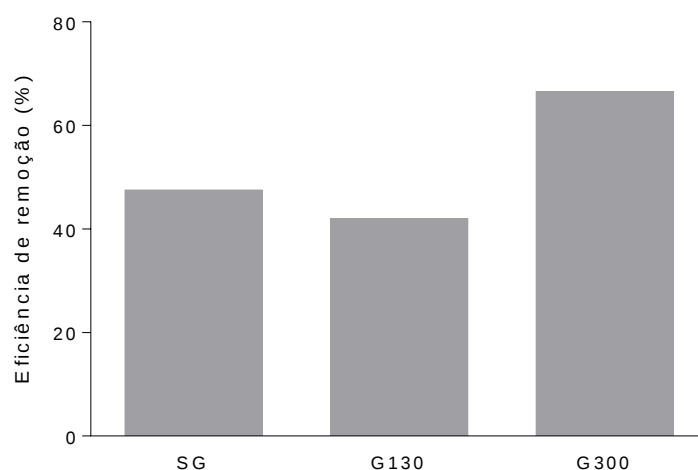


Figura 6 – Eficiência de remoção de SST, SSV e SSF nas colunas de percolação.

O acúmulo de SST por volume infiltrado de esgoto tratado no sistema apresentou uma boa correlação com a condutividade hidráulica ($p < 0,05$) (Figura 7). Esse fato é confirmado pela literatura, já que a correlação entre a diminuição na condutividade hidráulica e a carga total acumulada de sólidos suspensos é significativa (PEDESCOLL *et al.*, 2011; SIEGRIST *et al.*, 1987).

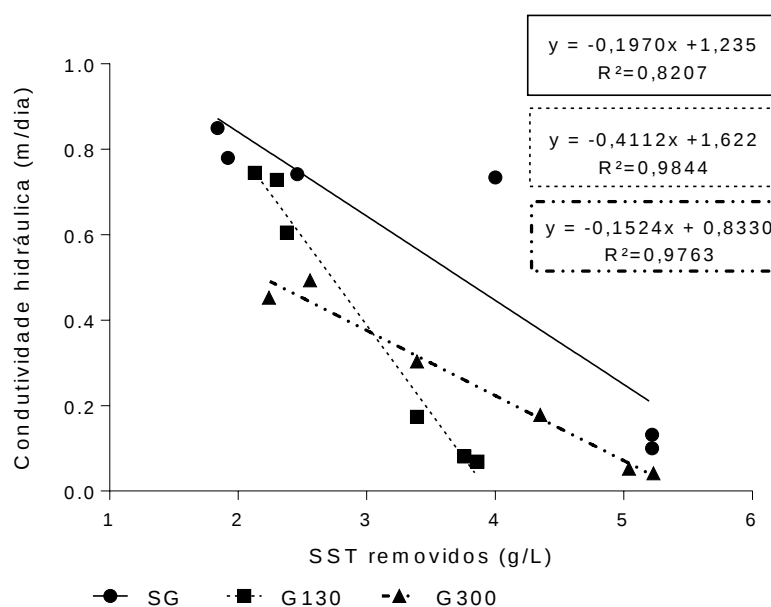


Figura 7 – Relação de SST por volume de afluente infiltrado com a condutividade hidráulica

Foi possível observar uma boa correlação entre o volume infiltrado de TS+FA_n e os sólidos totais removidos (Figura 8), constatando-se que G300 possui uma maior capacidade de retenção de sólidos por volume infiltrado.

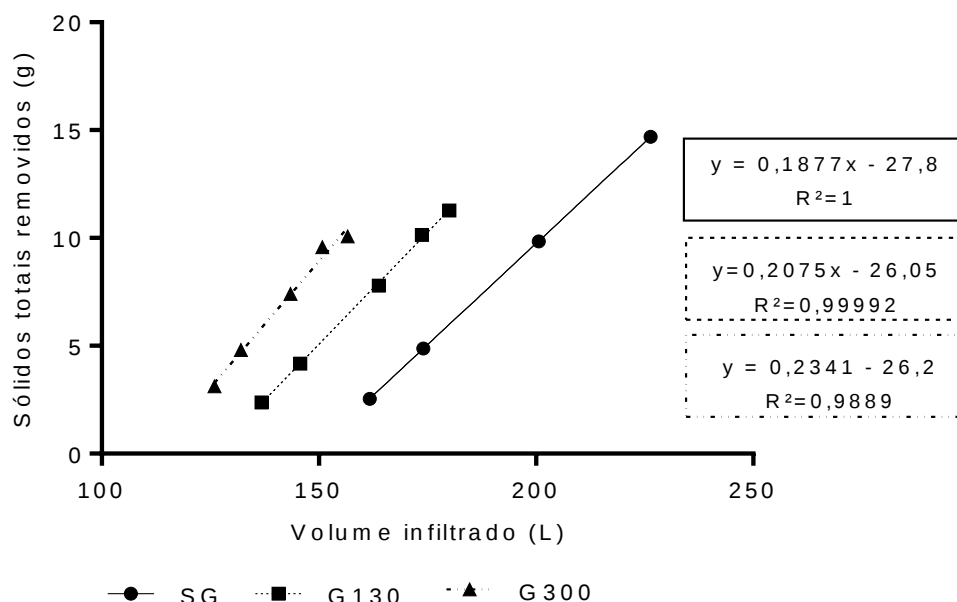


Figura 8 – Relação dos ST removidos e volume de esgoto tratado infiltrado

Nas configurações que não utilizaram o geotêxtil, o acúmulo de sólidos pode ser considerado um indicador direto do estado de colmatação do solo, contribuindo para a redução da condutividade. No entanto, esse processo não ocorre da mesma forma nos sistemas que fazem o uso do geotêxtil, uma vez que, o material retém grande parte dos sólidos, evitando o contato dos mesmos com o solo, reduzindo a colmatação. Já a redução da condutividade hidráulica é influenciada tanto pela retenção de sólidos como pela perda de carga causada pela presença do geotêxtil.

3.3 ANÁLISE DO SOLO

As análises do teor de matéria orgânica das camadas de solo que compunham as configurações do sistema constataram que a colmatação é mais

intensa na superfície do solo e logo abaixo dela (Figura 9), fato já evidenciado na literatura (RICE, 1974; BEACH *et. al*, 2005).

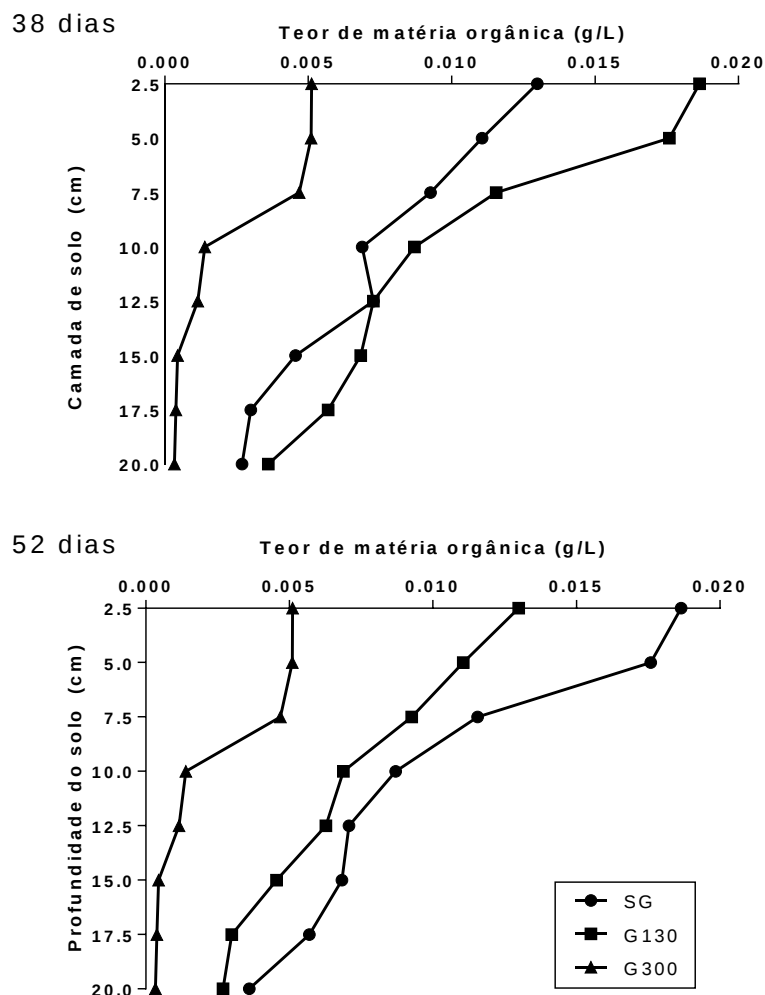


Figura 9 - Teor de matéria orgânica por volume infiltrado ao longo das colunas de percolação no 38^a e 52^a dia.

O uso do geotêxtil contribuiu para a redução do teor da matéria orgânica no solo, em especial nas camadas mais superficiais (Figura 9). No entanto, apenas em G300 essa redução foi significativa ($p < 0,05$), quando comparado à configuração SG, tanto no 38^a como no 52^a dia.

Houve diferença significativa ($p < 0,0001$) nos teores de matéria orgânica acumulada entre o 38^a e 52^a dia, nas colunas SG e G130, o que não foi percebido em G300 ($p = 0,093$) (Figura 10). A partir dos 10 cm superiores de camada de solo, nas configurações com geotêxtil, particularmente no de maior gramatura, o teor

de matéria orgânica sofreu pouco acréscimo. Assim, a presença do geotêxtil contribuiu para a conservação do solo, principalmente nas camadas mais profundas.

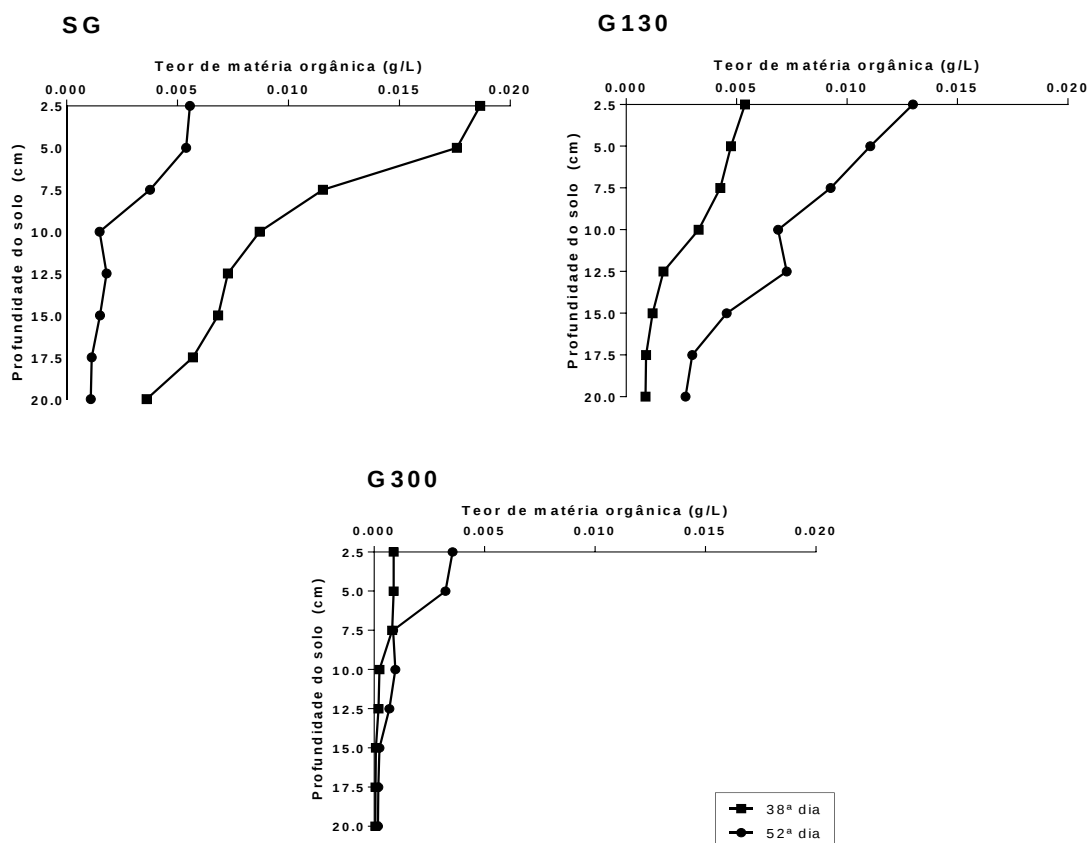


Figura 10 - Teor de matéria orgânica por volume infiltrado em cada coluna de percolação no 38ª e 52ª dia.

4. CONCLUSÃO

O uso dos geotêxteis não tecidos auxilia na preservação do solo arenoso, sob condições anaeróbias, em sistemas de percolação de esgoto tratado. Isso ocorre porque grande parte dos sólidos presentes no afluente fica retida no geotêxtil, principalmente no de 300 g/m². Assim, a colmatção no solo dos sistemas que fazem o uso do geossintético ocorre em menores proporções, conservando a integridade do solo e, conseqüentemente, prolongando da capacidade de infiltração do mesmo.

A falta de aeração em sistemas de percolação acelera a colmatção, interferindo na capacidade de infiltração do solo arenoso. Outros fatores como a taxa de aplicação, carga disponível, temperatura e a qualidade do esgoto tratado lançado no solo, também interferem no processo de colmatção.

Várias distribuições de sistemas de percolação podem ser testadas a fim de verificar quais fatores interferem na redução da capacidade de infiltração dos solos, de forma a encontrar melhores condições para sistemas de disposição. As variações dessas novas distribuições podem incluir: diferentes tipos de solo, taxas de aplicação variáveis, tempo de procedimento prolongado, tipo do geotêxtil, condições ambientais e etc.

REFERÊNCIAS

APHA, AWWA, WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 22 ed. New York: American Public Health Association Inc., 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969**: Tanques sépticos - Unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos - Projeto, construção e operação. Rio de Janeiro, 1997.

BAVEYE, P.; VANDEVIVERE, P.; HOYLE, B.L.; DELEO, P.C.; SANCHEZ DE LOZADA, D. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, volume 28, p. 123-191, 1998.

BEACH, D.; MCCRAY, J.; LOWE, K.; SIEGRIST, R. Temporal changes in hydraulic conductivity of sand porous media biofilters during wastewater infiltration due to biomat formation. **Journal of Hydrology**, volume 311, p. 230-243, 2005.

BEAL, C. D.; GARDNER, E. A.; KIRCHHOF, N. W. Menzies. Long-term flow rates and biomat zone hydrology in soil columns receiving septic tank effluente. **Water Research**, volume 40, p. 2327-2338, 2006.

CASARINI, D.C.P.; DIAS, C.L. & LEMOS, M.M.G. Relatório de estabelecimento de valores orientadores para solos e águas subterrâneas no estado de São Paulo. IV Série. São Paulo, CETESB, 2001. 73p. **(Série Relatórios Ambientais)**

DAS, Braja M.. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. 6. ed. Sacramento: Thomson, 2006.

DAVIES, B. E. Loss-on-ignition as an Estimate of Soil Organic Matter. **Soil Science Society of America Proceedings**, v. 38, p. 347-353, 1974.

FONTOURA, Tahyara Barbalho. Comportamento tensão-deformação e resistência ao cisalhamento de uma areia de dunas cimentada artificialmente. 2015. 162 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2015.

LEVERENZ, Harold L.; TCHOBANOGLOUS, George; DARBY, Jeannie L.. Clogging in intermittently dosed sand filters used for wastewater treatment. **Water Research**, p.695-705, fev. 2009.

MASSOUD, May A; AKRAM TARHINI, Joumana A. Nasr. Decentralized approaches to wastewater treatment and management: Applicability in developing countries. **Journal of Environmental Management**, p.652–659, jul.2009.

MLYNAREK, J.; LAFLEUR, J.; LEWANDOWKI, J.B. Field study of long term geotextile performance. Proceedings of the Fourth International Conference on Geotextiles, Geomembranes and Related Products. **The Hague, Netherlands**, volume. 1, p. 259-262, 1990.

OBER. Geofort Geotêxtil: catálogo. Rio de Janeiro, 2015. Disponível em:< http://www.obergeo.com.br/catalogo/catalogo_geofort.pdf>. Acesso em: 18 dez.2015.

OLIVEIRA JÚNIOR, José Lima de; SOUSA, José Tavares de; SILVA, Saionara Alexandre da. Comportamento da Infiltração de Esgotos Domésticos Tratados em Sistemas Anaeróbios. **Conex. Ci. e Tecnol.**, Fortaleza, p.18-24, nov. 2013.

PAVELIC, P. et al. Laboratory assessment of factors affecting soil clogging of soil aquifer treatment systems. *Water Research*, p. 3153-3163, abr. 2011.

PEDESCOLL, Anna et al. The effect of primary treatment and flow regime on clogging development in horizontal subsurface flow constructed wetlands: An experimental evaluation. **Water Research**, p.3579-3589, jun. 2011.

PELL, M.; NYBERG, F. Infiltration of wastewater in a newly started pilot sand-filter system: Development and distribution of the bacterial populations. **Journal of Environmental Quality**, volume 18, p. 457-462, 1989.

RICE, Robert C.. Soil Clogging during Infiltration of Secondary Effluent. **Water Pollution Control Federation**, p. 708-716, abr. 1974.

ROLLAND, L.; MOLLE, P.; LIE'NARD, A.; BOUTELDJA, F.; GRASMICK, A. Influence of the physical and mechanical characteristics of sands on the hydraulic and biological behaviors of sand filters. **Desalination**, volume 248, p. 998-1007, 2009.

SIEGRIST, Robert L.; BOYLE, William C.. Wastewater-Induced soil clogging development. **Journal of Environmental Engineering**. p. 550-566. jun. 1987.

SOLEIMANI, Sahar. Van; GEEL, Paul J.; ISGOR, O. Burkan; MOSTAFA, Mohamed B.; Modeling of biological clogging in unsaturated porous media. **Journal of Contaminant Hydrology**, volume 106, p.39–50, 2009.

TOMARAS, Jill et al. Microbial Diversity of Septic Tank Effluent and a Soil Biomat. **Applied and Environmental Microbiology**, Colorado, p. 3348-3351, mar. 2009.

YAMAN, Cevat; MARTIN, Joseph P.; KORKUT, Eyup. Use of Layered Geotextiles to Provide a Substrate for Biomass Development in Treatment of Septic Tank Effluent Prior to Ground Infiltration. **Journal of Environmental Engineering**, p.1667-1675, dez. 2005.

SMITH, A.;DILLON, P. Fluid flow and biogeochemical processes in porous media: a survey of laboratory columns designs. **Centre for Groundwater Studies Report**, volume 77,1997.