

# TRANSPORTE DE NITRATO EM CAMADA DE SOLO COMPACTADA

Leonardo Ramos da Silveira<sup>1</sup>  
Renato Welmer Veloso<sup>2</sup>  
Newton Moreira Souza<sup>3</sup>  
André Luís Brasil Cavalcante<sup>4</sup>

## RESUMO

A disposição inadequada de resíduos sólidos, principalmente os gerados do saneamento básico, é um impacto constante sobre o meio ambiente. Os resíduos líquidos e sólidos apresentam constituintes físico-químicos e biológicos com potencial para contaminar o solo e os recursos hídricos. Este trabalho avaliou a cinética de difusão de nitrato através de uma camada de solo compactada, por meio de ensaios de difusão em escala laboratorial, com diferentes concentrações do extrato de lodo bruto em diferentes tempos. A difusão do nitrato causou pouca dispersão no solo compactado. A concentração de nitrato no corpo de prova diminuiu do topo para a base, o que foi observado nas amostras após oito e 32 dias. A quantidade de íons nitrato adsorvidos e, ou, difundidos aumentou nessas amostras. Assim, o tempo de contato do nitrato com o solo foi um fator importante nesse aumento. Para o ensaio de sorção notou-se um ajuste satisfatório para ambas isotermas utilizadas.

**Palavras-chaves:** solo compactado, ensaio de difusão, transporte de nitrogênio.

## NITRATE TRANSPORTATION ON COMPACTED SOIL LAYER

### ABSTRACT

Inadequate disposal of water, especially those generated from the Sanitation services, is a constant impact on the environment. Liquid and solid wastes present a physico-chemical and biological constituents with potential to contaminate soil and water resources. This work evaluated the nitrate diffusion kinetics through a compacted soil layer, through laboratory scale diffusion tests, with different concentrations of crude sludge extract at different times. The nitrate diffusion caused little dispersion in the compacted soil. The concentration of nitrate in the test specimen decreased from the top to the base, which was observed in the samples after eight and 32 days. The amount of adsorbed and / or diffused nitrate ions increased in these samples. Thus, the contact time of nitrate and soil was an important factor for this increase. For the sorption test a satisfactory fit was noted for both isotherms used.

**Key words:** compacted soil, diffusion tests, nitrogen transportation.

---

<sup>1</sup> Doutor em Geotecnia (UNB). Professor efetivo do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Águas Lindas.

<sup>2</sup> Doutor em Solos e Nutrição de Plantas (UFV). Professor efetivo do Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Goiás - Campus Águas Lindas.

<sup>3</sup> Professor da Universidade de Brasília, possui experiência em cartografia, contaminação de solos. Membro do Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

<sup>4</sup> Professor na Universidade de Brasília. Membro do Programa de Pós Graduação em Geotecnia.

## INTRODUÇÃO

As principais sociedades humanas se desenvolveram próximas aos recursos hídricos. Nesse contexto, também surgiu o conhecimento da capacidade que a água contaminada por resíduos gerados pelo homem se tornaria fonte de transmissão de doenças. Esse conhecimento gerou a adoção de medidas para controlar a contaminação da água de abastecimento humano, e a disposição final adequada dos resíduos sólidos gerados nesses processos de tratamento. Ações como estas permitiram o surgimento das principais ações de saneamento básico. Assim, os mecanismos de comando e controle tornaram-se mais evidentes no âmbito do saneamento ambiental, permitindo a edição e aprovação de leis específicas para atender as diferentes demandas do saneamento, objetivando a manutenção do equilíbrio e as condições sanitárias adequadas para o equilíbrio entre as atividades humanas e o meio ambiente.

No Brasil foi publicada a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, que estabeleceu as diretrizes nacionais para o saneamento básico. Essa lei definiu o conjunto de serviços, infra-estruturas, instalações e operações sobre abastecimento de água potável, esgotamento sanitário, limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos, drenagem e manejo de águas pluviais urbanas. Para complementar o saneamento em âmbito nacional foi publicada a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, a qual instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos. Também foram estabelecidas as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, as responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. A referida lei, ao instituir a Política Nacional de Resíduos Sólidos, diz que a gestão de resíduos se desenvolverá por meio de um conjunto de ações voltadas para o gerenciamento de resíduos sólidos, e integrado com as esferas política, econômica, ambiental, cultural e social, sob a premissa do desenvolvimento sustentável.

De acordo com Sperling (2005), o termo lodo de esgoto é utilizado para designar os subprodutos sólidos do tratamento de efluentes líquidos. Por outro lado, a escolha por biossólido é mais adequada por ressaltar os aspectos benéficos do material em relação a uma finalidade produtiva, quando considerada a sua principal destinação, seja a disposição final em aterros sanitários ou a incineração.

O lodo de esgoto pode conter metais pesados, como cádmio (Cd), cromo (Cr), níquel (Ni), zinco (Zn), cobre (Cu), manganês (Mn), entre outros elementos. Os teores destes elementos no lodo variam em função da procedência do resíduo. Além destes metais, o biossólido pode conter teores consideráveis de nitrogênio, na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), devido ao processo de digestão prévia do nitrogênio orgânico presente na matéria orgânica. Dessa forma, a aplicação inadequada de biossólidos ao solo pode incorrer no aumento dos teores de nitrato e causar a contaminação do lençol freático, comprometendo seus usos futuros. A elevada mobilidade dos nitratos no solo (Nascentes et al., 2009) é outro fator que potencializa a contaminação do lençol freático por nitrato, devido às cargas negativas que predominam na maioria dos solos. Concentrações de nitrato acima de  $20 \text{ mg L}^{-1}$  podem causar doenças, como a metahemoglobinemia e, além disso, a presença de compostos nitrogenados na água de consumo pode provocar câncer. A Portaria nº 2.914, de 2011, que trata sobre os parâmetros de potabilidade para água potável, estabeleceu o valor máximo permitido de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ , de nitrato.

A contaminação por nitrato decorre pela disposição inadequada de lodo de ETE. Isto é um problema ambiental, devido ao seu potencial de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas e, conseqüentemente, atingindo a cadeia trófica. O contato do nitrato com o solo ocorre na zona não saturada do solo, onde este ficará parcialmente retido pelas cargas superficiais das partículas sólidas. Entretanto, as interações entre o solo, fluido intersticial, ar e contaminantes nesta região ainda são pouco conhecidas, devido às poucas pesquisas realizadas sobre o aspecto geotécnico ambiental da disposição de lodo de esgoto.

Portanto, o conhecimento dos mecanismos de transporte simultâneo da água e de solutos no solo é essencial para pesquisas que envolvam pontos de vista ambiental e econômico, uma vez que abrange tanto a eficiência do uso da água quanto à aplicação de resíduos agroindustriais na produção agrícola, ou até mesmo a aplicação de lodo de esgoto. Esses insumos, quando aplicados acima da capacidade-suporte do solo, podem liberar íons e compostos tóxicos, os quais poderão poluir o solo e as águas subterrâneas. A lixiviação de nutrientes varia com os atributos físicos do solo, como textura, estrutura, profundidade do perfil e, principalmente, porosidade. Entre os atributos químicos que afetam a lixiviação, estão a capacidade de retenção de íons e o pH (SANTOS et al., 2002). O nitrato, por ser um ânion, apresenta uma grande mobilidade e potencial de lixiviação em solos com alto teor de cargas negativas, o que pode acarretar sérios problemas de contaminação de águas subterrâneas (NETO et al., 2017).

Em Brasília, a Companhia de Saneamento do Distrito Federal utiliza locais de transbordo para armazenar temporariamente o lodo de esgoto antes que o mesmo seja direcionado para a recuperação de áreas degradadas, e essas áreas de transbordo recebem, diariamente, a produção média de lodo de esgoto do Distrito Federal, de 320 t dia<sup>-1</sup> (massa úmida, com 18 a 20% de teor de sólidos). A estação de tratamento de esgoto - ETE Samambaia/Melchior - produz em torno de 48 t dia<sup>-1</sup> (massa úmida - 15 a 16 % de teor de sólidos). A disposição desse grande volume de lodo produzido diariamente nestas ETE's é uma justificativa do estudo dos mecanismos estabelecidos entre o nitrato e as partículas sólidas responsáveis por sua retenção.

Além disso, torna-se necessário o desenvolvimento de estudos complementares, cujo foco seja as alterações em camadas de solos compactados, uma vez que essas áreas de transbordo não apresentando contenções do ponto de vista de engenharia, necessitariam de camadas de solos compactas como barreira de contaminantes. Assim, esta pesquisa tem como principal objetivo verificar o transporte de nitrato em camadas de solo compactadas, com as características dos locais de disposição temporária de lodo localizado em Brasília - DF.

## MATERIAL E MÉTODOS

O solo foi coletado a partir do horizonte B de um Latossolo localizado no entorno da Estação de Tratamento de Esgoto da ETE Samambaia/Melchior. A camada de solo foi compactada e instalada no interior da célula de difusão. A amostra de solo passou pela caracterização física dos parâmetros: umidade higroscópica ( $w_0$ ), massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ), análise granulométrica convencional e com granulômetro a laser, limite de liquidez ( $w_L$ ), limite de plasticidade ( $w_P$ ), índice de plasticidade (IP), massa específica aparente seca ( $\rho_d$ ), índice de vazios ( $e$ ) e porosidade ( $n$ ).

A umidade higroscópica ( $w_0$ ) foi determinada de acordo com o ensaio preconizado pela NBR 6457 (ABNT, 1986). Determinou-se a massa específica real dos grãos ( $\rho_s$ ) de acordo

com a norma da NBR 6508 (ABNT, 1984). Para a análise granulométrica foram adotados os procedimentos estabelecidos nas normas NBR 7181 (ABNT, 1984) e NBR 13602 (ABNT, 1996).

Os ensaios de compactação foram realizados em equipamento em miniatura ME 228 (DNER, 1994a), as amostras de solos foram compactados em equipamento em miniatura Mini-MCV ME 258 (DNER, 1994b) e a determinação da perda de massa por imersão em ME 256 (DNER, 1994c).

Os limites de consistência foram determinados conforme a NBR 6459 (ABNT, 1984) limite de liquidez, e limite de plasticidade NBR 7180 (ABNT, 1984). O ensaio de compactação para obtenção da curva de compactação e da massa específica aparente seca foi determinada conforme a NBR 7182 (ABNT, 1986). A curva de compactação foi gerada pelo ensaio tipo Proctor Normal, a partir dos dados de massa específica aparente seca para cada umidade de solo compactado. Determinou-se a permeabilidade a partir da norma NBR 14545 (ABNT, 2000), que gera o coeficiente de permeabilidade de solos argilosos de carga variável.

### *ENSAIO DE DIFUSÃO COM NITRATO*

O ensaio de difusão foi baseado no método desenvolvido por Barone et al. (1989) e adaptado por Boscov (1997) para solos compactados, com modificações. As células de difusão foram desenvolvidas segundo Gurjão (2005), construídas em acrílico, com dimensões de 11,7 cm de altura e 9,7 cm de diâmetro, com base e topo parafusáveis e anéis de vedação (*o-rings*), para obter uma estanqueidade total da célula. O corpo de prova (solo compactado) utilizado foi de 3 cm de altura e diâmetro igual a 9,7 cm.

Os seis corpos de prova (CP1, CP2, CP3, CP4, CP5 e CP6) foram compactados nas células de difusão, sendo que um deles foi preenchido com água deionizada, configurando o tratamento testemunha (CP6). O solo foi umidificado na umidade ótima de Energia Proctor Normal. O volume aplicado foi calculado pela quantidade em massa necessária para ocupar o volume da célula com a massa específica aparente seca máxima obtida no ensaio de compactação.

O lodo de esgoto bruto utilizado no experimento foi coletado na lagoa de lodo da estação de tratamento de esgoto da ETE Samambaia/Melchior, no Distrito Federal (Figura 1).



Figura 1. Coleta do contaminante de lodo de esgoto gerado na Estação de Tratamento de Esgotos Samambaia/Melchior, no Distrito Federal.

O procedimento experimental consistiu em monitorar a concentração de nitrato do contaminante de lodo de esgoto colocado em contato com o *liner* compactado na célula de difusão dos reservatórios. Os tratamentos CP1 e CP2 permaneceram por um período de quatro dias. Enquanto isso, os tratamentos CP3 e CP4 tiveram uma duração de oito dias e o tratamento CP5 permaneceu por 32 dias. A concentração de nitrato aplicado foi de 905 mg L<sup>-1</sup> (CP1), 240 mg L<sup>-1</sup> (CP2), 905 mg L<sup>-1</sup> (CP3), 240 mg L<sup>-1</sup> (CP4) e 520 mg L<sup>-1</sup> (CP5). A Figura 2 mostra os corpos de prova dos tratamentos CP1, CP2, CP3 e CP4.

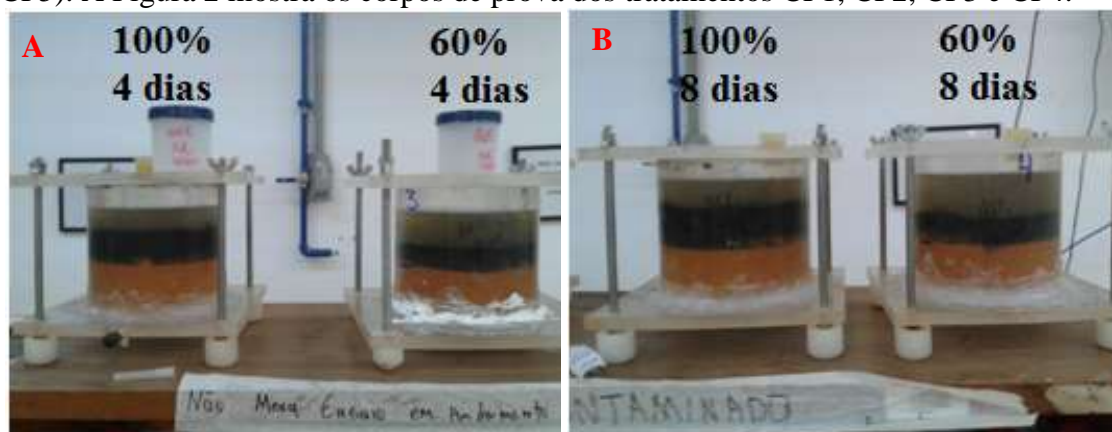


Figura 2. Células de difusão dos diferentes tratamentos. (a) CP1 e CP2; (b) CP3 e CP4.

Periodicamente as amostras de sobrenadantes foram coletadas (10 mL) das células de difusão, com o auxílio de seringa, para a determinação da concentração de nitrato. As coletas foram realizadas da seguinte maneira:

- 1 – nos tratamentos CP1 e CP2 (quatro dias) foram coletadas três amostras no primeiro dia, e duas amostras nos demais dias;
- 2 – nos tratamentos CP3 e CP4 (oito dias) foram coletadas três amostras no primeiro dia, e uma nos demais dias;
- 3 – no tratamento CP5 (32 dias) foi coletada uma amostra com intervalos de dois dias.

A concentração de nitrato foi determinada adotando-se o método colorimétrico de redução por cádmio utilizando o kit da HachNitraver5, realizado no Laboratório de Saneamento da Universidade de Brasília (UnB). As alíquotas coletadas eram diluídas num fator de 50 vezes para as amostras de 100%, e 20 vezes para as amostras de 60%, conforme indicado na Figura 3, após a diluição, uma alíquota de 25 mL foi transferida para a cubeta, e acrescentado o sache Nitraver5 para reação e redução, de forma que o espectrofotômetro realizasse a leitura (Figura 4). Ressalta-se que a diluição era necessária, uma vez que este método tem sensibilidade de detecção na faixa de 0,3 a 30 mg L<sup>-1</sup> de NO<sup>-3</sup>.



Figura 3. Recipientes e preparação das alíquotas para diluição.



Figura 4. Espectrofotômetro para leitura dos teores de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ).

Para a determinação de nitrato no solo, o *liner* foi retirado das células de difusão e fatiado, sendo que cada fatia possuía 1 cm de espessura. De cada fatia foram pesadas 25 g de solo em triplicata para cada camada e dispostos em coletores universais, e foram adicionados 50 mL de água destilada; em seguida, os mesmos foram levados para a mesa de agitação horizontal (Figura 5), por 24 horas. Após a agitação, as amostras foram transferidas para frascos e centrifugadas por dois minutos; retirado o sobrenadante e determinado o teor de nitrato via método de redução de cádmio. As análises foram realizadas seguindo os descritos de Fonseca Netto (2007) e Nascentes et al (2009).



Figura 5. Amostras de solo em mesa agitadora horizontal.

O ensaio de sorção de nitrato do solo foi realizado em laboratório, segundo os seguintes procedimentos:

- 1 – O lodo de esgoto foi diluído com água destilada nas concentrações de 20%, 40%, 60%, 80% e 100%;
- 2 – O solo foi seco e passado em peneira de 2 mm e homogeneizado;
- 3 – As amostras de solo preparadas foram colocadas em frascos de coleta universal com capacidade de 50 ml. A massa de solo utilizada foi de 4,00 g de solo, e aplicados 40 ml das diferentes diluições do lodo, na razão de 1:10 (solo:solução);
- 4 – Os frascos, as soluções de nitrato e o solo permaneceram em agitação por 24 horas, no agitador do laboratório de Saneamento e Recursos Hídricos da UnB;
- 5 – Após a agitação, a solução 1:10 de todas as configurações do item 4, foram transferidos para tubos e centrifugados por cinco minutos, e o sobrenadante foi filtrado em membrada de ester de celulose (<0,45 µm);
- 6 – As concentrações inicial e final de nitrato nas soluções iniciais e nos filtrados dos sobrenadantes foram determinadas, respectivamente.
- 7 – Plotagem da quantidade de nitrato retido por massa de solo.

A relação massa de nitrato adsorvido por unidade de solo para cada diluição da solução contaminante foi calculada pela seguinte fórmula:

$$S (\%) = \frac{(C_0 - C)}{m} \times V \quad (1)$$

Onde: S = sorção de nitrato (mg g<sup>-1</sup>);

C<sub>0</sub> = concentração inicial de nitrato da solução, colocada em contato com o solo (mg L<sup>-1</sup>);

C = concentração final obtida após o equilíbrio (mg L<sup>-1</sup>);

V = volume da solução utilizada (L);

m = massa de solo (g).

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Não houve identificação da fração argila nas amostras de solo a partir da análise granulométrica sem defloculante. Foram quantificados pedregulho, areia e silte, sendo o silte predominante, com 45%. A textura do solo sem defloculante foi classificada como silte arenoso. Enquanto isso, a textura do solo com defloculante apresentou 42% de argila e 32% de silte, sendo classificado como argila siltosa. Assim, o solo é adequado para os ensaios de compactação, e apresenta baixo nível de pseudo-siltes.

O ensaio de massa específica dos grãos foi realizado de forma convencional encontrando-se um valor de 2,68 g cm<sup>-3</sup>, que é próximo ao valor médio dos solos brasileiros, de 2,65 g cm<sup>-3</sup>. A massa específica aparente seca máxima foi de 1,38 g cm<sup>-3</sup>, a umidade ótima foi de 27,5%, índice de vazios de 0,94 e porosidade de 48%. O ensaio de limite de Atterberg apresentou limite de liquidez de 54% e de plasticidade de 39%. O solo foi classificado como areia laterítica por meio do ensaio de minicompactação e da classificação MCT expedita.

O ensaio de permeabilidade foi realizado com a amostra indeformada natural, moldado no cilindro de compactação, e amostras compactadas foram analisadas para a obtenção da umidade ótima de compactação (27,5%), obtendo-se os seguintes valores, respectivamente, 2,2 x 10<sup>-5</sup> e 4,5 x 10<sup>-9</sup> m<sup>-1</sup> s<sup>-1</sup>. Nogami e Villibor (1995) observaram baixa

permeabilidade ou impermeabilidade em Latossolos Amarelos após a compactação, com valores de permeabilidade variando de  $10^{-9}$  a  $10^{-8} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ ; esses valores estão dentro dos valores estabelecidos para esse tipo de solo.

A caracterização química das amostras de solo, de lodo de esgoto, está apresentada nas Tabelas 1 e 2.

Com relação aos dados do complexo sortido, verificam-se valores baixos, o que influencia diretamente na capacidade de troca de cátions, onde, em grande parte, as cargas estão relacionadas com a acidez potencial (H+Al).

A caracterização do extrato centrifugado de lodo foi realizada inicialmente para determinara sua composição em termos dos teores de metais pesados e atributos físico-químicos, como: pH, condutividade, sólidos totais, alumínio, potássio, sódio, cloreto, cobre, manganês, ferro, zinco, nitrato, boro, cálcio, magnésio, arsênio, cádmio, chumbo, níquel, cromo, sulfeto, cianeto, sulfato mercúrio (Tabela 2).

Tabela 1 – Caracterização físico-química do solo com adição de lodo de esgoto do experimento da Estação de Tratamento de Esgoto Samambaia/Melchior, no Distrito Federal.

Parâmetros	Unidade	Solo	Lodo de esgoto
pH em H <sub>2</sub> O		6,0	6,8
pH em KCl		4,8	nd*
Fósforo (P)	mg dm <sup>-3</sup>	0,2	117,0
Cálcio (Ca)	cmol <sub>c</sub> dm <sup>-3</sup> (mEq 100 mL <sup>-1</sup> )	0,6	1,21
Magnésio (Mg)		0,1	0,47
Potássio (K)		0,07	0,46
Sódio (Na)		0,03	0,07
Alumínio (Al)		0,0	0,2
Acidez potencial (H+Al)		3,2	3,4
Soma das bases		0,8	1,21
CTC (T)		4,0	21,0
Saturação de Bases (V)		20,0	26,0
Saturação por Alumínio (m)	%	0,0	14,8
Saturação com Sódio (ISNa)		0,8	5,8
Carbono Orgânico (C) (g kg <sup>-1</sup> )	dag.kg <sup>-1</sup>	1,15	1,68
Matéria orgânica (MO) (g kg <sup>-1</sup> )		1,98	2,89
Relação C/N		nd	62,5
Demanda Química de Oxigênio-DQO	mg L <sup>-1</sup>	nd	749,0
Soma de sais	mg kg <sup>-1</sup>	nd	222,0
Boro	mg dm <sup>-3</sup>	nd	104,0
Cromo (Cr)		<0,01	0,02
Cádmio (Cd)		<0,01	<0,01
		nd	6,98
Níquel (Ni)		<0,01	<0,01
Cobre disponível (Cu)		1,24	0,10
Manganês (Mn)		0,22	0,06
Zinco (Zn)		1,04	0,4



Tabela 2 – Atributos físico-químicos no extrato de lodo de esgoto centrifugado, da Estação de Tratamento de Esgoto Samambaia/Melchior, no Distrito Federal.

<b>Parâmetros Analisados</b>	<b>Resultados</b>
pH	7,21
Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )	1.527,00
Sólidos totais ( $\text{mg L}^{-1}$ )	759,00
Alumínio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,00
Potássio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,78
Sódio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,23
Cloreto ( $\text{mg L}^{-1}$ )	12,42
Cobre ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,18
Manganês ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,90
Ferro ( $\text{mg L}^{-1}$ )	4,64
Zinco ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,67
Nitrato ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,05
Boro ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,03
Cálcio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	6,01
Magnésio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,22
Arsênio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,01
Cádmio ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,01
Chumbo ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,02
Níquel ( $\text{mg L}^{-1}$ )	0,01
Cromo ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,01
Sulfeto ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,01
Cianeto ( $\text{mg L}^{-1}$ )	<0,01
Sulfato ( $\text{mg L}^{-1}$ )	1,99

Os elementos Mn e Cu apresentaram concentrações acima dos recomendados pelos padrões de referência, o que poderia comprometer a qualidade ambiental onde o mesmo fosse lançado. Ressalta-se que a referida estação de tratamento não possui tratamento químico específico para a remoção de metais pesados, ficando o tratamento restrito à remoção de matéria orgânica, patógenos e nutrientes. O restante dos elementos avaliados apresentaram baixas concentrações, o que pode estar relacionada ao baixo nível de contaminação do lodo (Tabela 1).

O valor de umidade do lodo seco ao ar por 48 horas foi de 145,93%, quando seco nas lâmpadas apresentou 236,73%, e na estufa com temperatura de 109 °C a umidade foi de 253,5%. A quantidade de cinzas foi determinada para as temperaturas de 250 e 500 °C e os valores encontrados foram 13,75 e 8,01 %, respectivamente, indicando, assim, alta quantidade de material orgânica volátil.

Com base na caracterização do lodo de esgoto e do solo, observaram-se maiores valores dos parâmetros fósforo, CTC e V (%). Os altos valores de CTC indicam a possibilidade de troca de cátions e, conseqüentemente, favorecimento do mecanismo de sorção de cátions, promovendo aumento da CTC em solos com baixa retenção de cátions, como em processo de recuperação de áreas degradadas. O lodo de esgoto apresentou elevado teor de material orgânico, o que implica em elevada retenção de umidade e potencial de utilização como adubo. Além disso, os teores de elementos químicos foram classificados com baixos, pelos índices de recomendação de adubação para solos, exceção do boro, que apresentou teores elevados (Tabela 1). Isso deve ser considerado para evitar a contaminação do solo, devido à aplicação excessiva de lodo de esgoto.

A determinação da difusão de  $\text{NO}_3^-$  foi realizada em três tempos, aos quatro, oito e 32 dias. As Figuras 6, 7 e 8 apresentam os perfis de concentração de nitrato no fluido no reservatório. Nas Figuras 9 e 10 estão apresentadas as concentrações de nitrato para as camadas de solo submetidas ao ensaio de difusão.

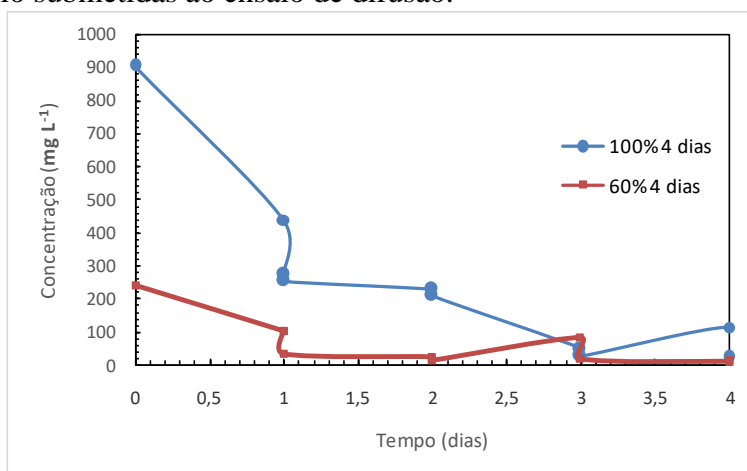


Figura 6 – Concentração de nitrato no reservatório de lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgotos Samambaia/Melchior, no Distrito Federal, aos quatro dias de avaliação.

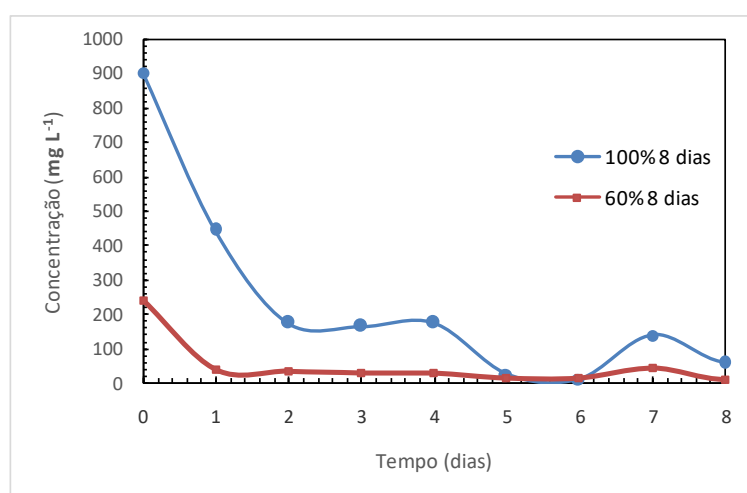


Figura 7 – Concentração de nitrato no reservatório de lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgotos Samambaia/Melchior, no Distrito Federal, aos oito dias de avaliação.

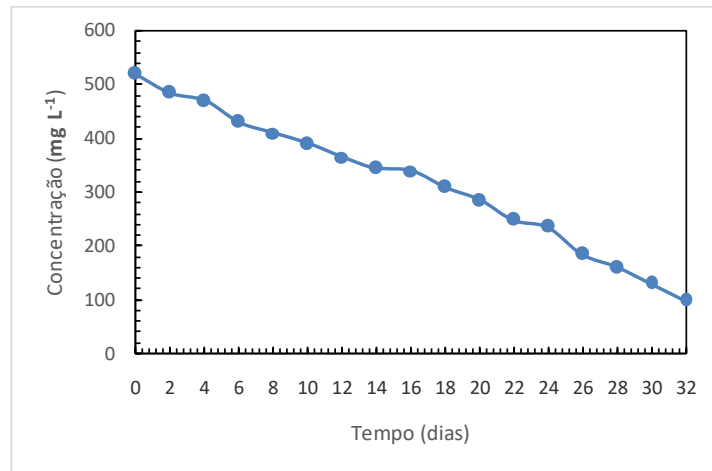


Figura 8 – Concentração de nitrato no reservatório de lodo de esgoto da Estação de Tratamento de Esgotos Samambaia/Melchior, no Distrito Federal, aos 32 dias de avaliação.

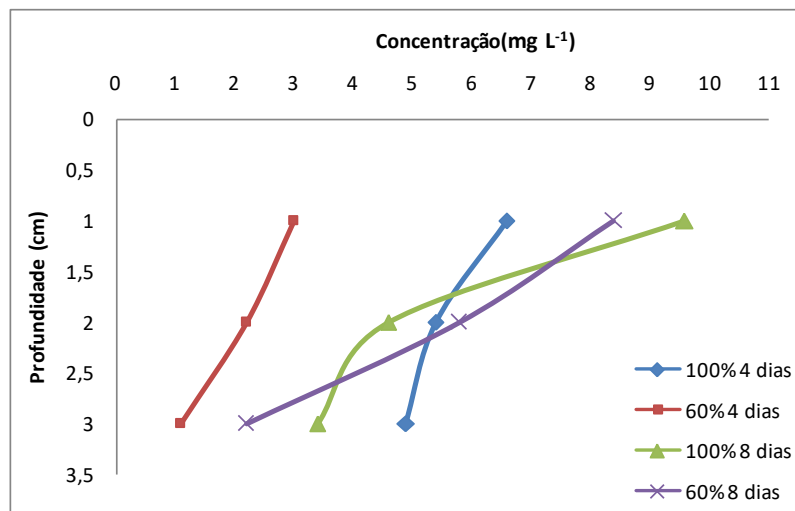


Figura 9 – Concentração de nitrato nas camadas de solo (60% e 100%), aos quatro e oito dias das avaliações.

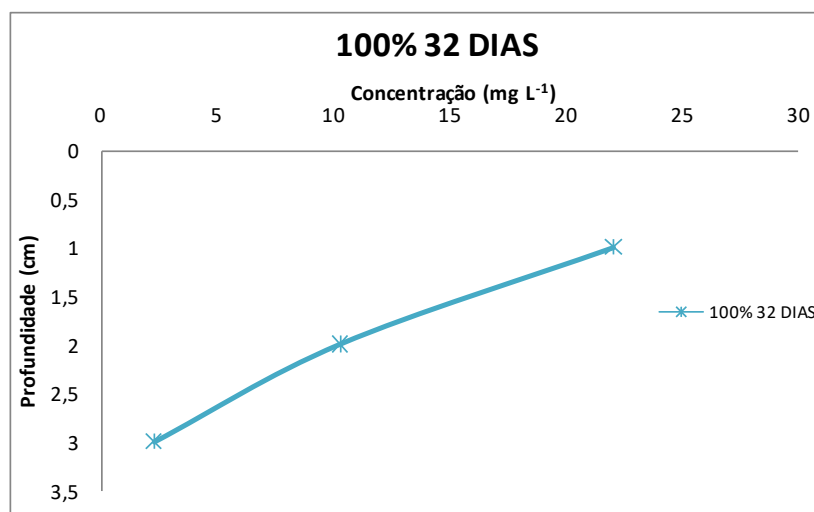


Figura 10 - Concentração de nitrato na camada de solo (100%), aos 32 dias de avaliação.

O ensaio de difusão de nitrato apresentou pouca variabilidade, uma vez que é perceptível a tendência de diminuição dos valores nos efluentes dos reservatórios. Apenas nos tratamentos CP1 e CP2, avaliados aos quatro dias, observa-se uma maior variabilidade do nitrato para o lodo bruto de esgoto, considerando-se o processo de conversão e estabilização da matéria orgânica. Este processo pode converter nitrogênio orgânico em nitrato, conforme observado nos picos de nitrato (Figuras 6 e 7). Outra hipótese para o aumento de nitrato perceptível em alguns pontos é o fato do líquido no reservatório apresentar duas fases bastante distintas. Assim, houve a formação de uma camada na parte superior mais clara e outra na inferior mais escura e densa, e como as coletas se processaram ao longo do tempo, houve a coleta do líquido escuro e denso, mais abaixo, onde se encontra a maior concentração de nitrato, não detectável pelo método de redução cádmio. No entanto, no tratamento CP5, com duração de 32 dias, foi possível observar a constante queda dos valores de nitrato, e isso se deu em função da homogeneização da amostra diariamente, e toda vez que era realizada a coleta, diminuindo, assim, partes preferenciais de concentração de  $\text{NO}_3^-$ .

Para a concentração de nitrato no solo, observou-se a difusão ao longo do perfil de solo (Figuras 9 e 10). Nas amostras de oito e 32 dias, houve aumento na quantidade de íons adsorvidos e, ou, difundidos, indicando ser a duração um fator importante nesse tipo de ensaio, além de observar que a concentração também foi determinante para o fenômeno de adsorção/difusão. Nascentes et al. (2009) e Fonseca Neto (2007) e Lelis Neto et al (2017), ao estudarem a difusão de nitrato em solo tropical observaram os mesmos fenômenos de mudanças na concentração em função do tempo. Ao tentar classificar o solo do *liner*, após o ensaio de difusão, conforme a Resolução Conama nº 420, de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas, notou-se que os valores ficaram acima de  $1 \text{ mg L}^{-1}$ , o que enquadraria o mesmo em solos classe 4, merecendo atenção especial e investigação.

Nas Figuras 11 e 12 apresentam-se os dados de sorção no solo comparativamente com a concentração de nitrato para os modelos de isotermas de Langmuir e de Freundlich. Na Figura 13 estão apresentados os modelos de ajustes para as isotermas de Freundlich.

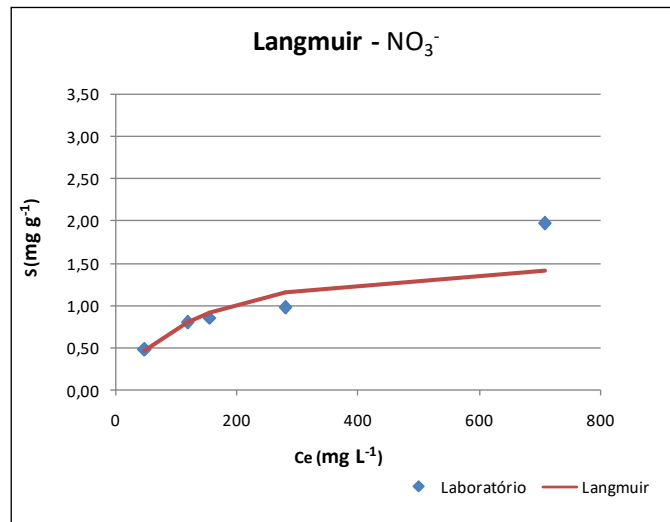


Figura 11 – Isoterma de Langmuir para o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

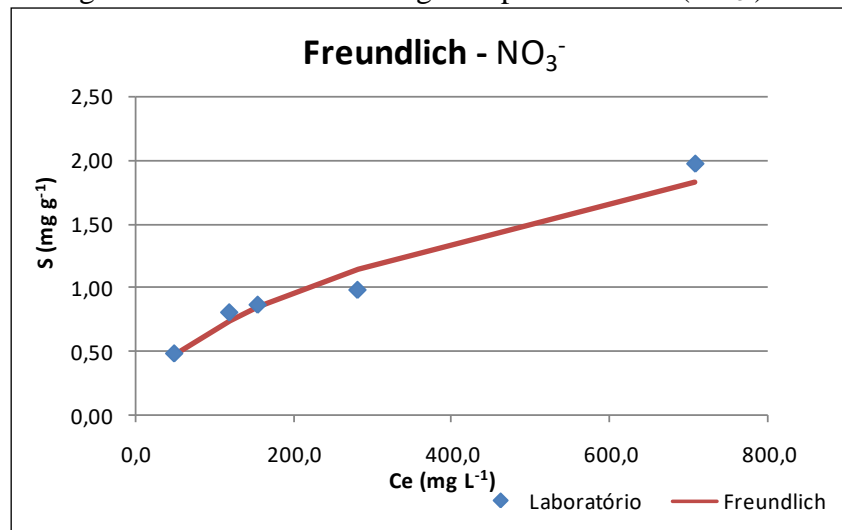


Figura 12 – Isotermas de Freundlich para o nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>).

O nitrato apresentou ajuste satisfatório em ambas isotermas, de Langmuir e de Freundlich, no entanto, é possível observar pontos fora da linearidade nas Figuras 11 e 12, e isso pode ser justificado pela dessorção, ou seja, pode ter ocorrido quando o solo saturou sua capacidade de sorção, e começou a liberar o íon introduzido.

## CONCLUSÃO

O solo apresenta textura argila siltosa e, quando compactado, sua permeabilidade foi de  $4,5 \times 10^{-9} \text{ m}^{-1} \text{ s}^{-1}$ , caracterizando-o como bom material para confecção de *liner* compactado. A caracterização química do solo evidenciou que o mesmo possui baixa quantidade de elementos e uma baixa capacidade de troca de cátions, contribuindo para influenciar diretamente nos mecanismos de sorção.

No ensaio de transporte de contaminantes para o nitrato observou-se uma pequena dispersão, o que era esperado, pois o contaminante apresentou intensa atividade biológica, e que nos processos de conversão/estabilização da matéria orgânica carbonácea poderá liberar o nitrogênio na forma de nitrato. A mobilidade do nitrato na camada de solo compactada ficou condicionada na distribuição característica do topo para a base. Assim, o processo de difusão no *liner*, apresentou uma relação direta com a concentração e a proximidade com a fonte de nitrato. Dessa forma, a pesquisa com difusão de nitrato para o solo em questão, configura a camada de solo compactada como um *liner* característico para a retenção de contaminantes.

## REFERÊNCIAS

- ABNT (1984). Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7180 - Solo - Determinação do limite de Plasticidade. 3 p.
- ABNT (1984). Determinação do Limite de Liquidez. NBR-6459. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 6 p.
- ABNT (1984). Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm – Determinação da massa específica. NBR-6508. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 8p.
- ABNT (1984). Solo – Análise Granulométrica. NBR-7181. ABNT. Rio de Janeiro. RJ. 13 p.
- ABNT (1986). Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização (método de ensaio). NBR-6457/1986. Rio de Janeiro. RJ. 8 p.
- ABNT (1986). Associação Brasileira de Normas Técnicas - NBR 7182 - Solos - Ensaio de Compactação. 10 p.
- ABNT (1996). Solo – Avaliação da dispersividade de solos argilosos pelo método sedimentométrico comparativo – Ensaio de dispersão SCS. NBR-13602. Rio de Janeiro, RJ. 5 p.
- ABNT (1997). Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável. NBR-14545. Rio de Janeiro, RJ. 12 p.
- BOSCOV, M. E. G. (1997). Contribuição ao Projeto de Sistemas de Contenção de Resíduos Perigosos Utilizando Solos Lateríticos. Tese de Doutorado. EPUSP, São Paulo.
- BRASIL. (2005). Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2005. Estabelece as diretrizes nacionais para o saneamento básico e dá outras providências. Diário Oficial União [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 5 de jan. 2007.
- BRASIL. (2010). Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 de ago. 2010.
- DNER (1994a). Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME228 -Solos- Compactação em equipamento miniatura. 14 p.
- DNER (1994b). Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME256 - Solos – Compactação em equipamento miniatura – determinação da perda de massa por imersão. 6 p.
- DNER (1994c). Departamento Nacional de Estradas e Rodagem - ME258 - Solos – Compactação em equipamento miniatura – Mini-MCV. 14 p.
- FONSECA NETO, F. D. (2007). Determinação da difusão efetiva de nitrato e potássio em solo argiloso compactado. Dissertação de Mestrado em Ciência da Tecnologia – Engenharia Civil, Universidade Estadual do Norte Fluminense, Rio de Janeiro, RJ, 113p.

Disponível em:<[http://uenf.br/Uenf/Downloads/LECIV\\_1693\\_1225287911.pdf](http://uenf.br/Uenf/Downloads/LECIV_1693_1225287911.pdf)>. Acesso em julho de 2014.

GURJÃO, C. M. C. (2005). Estimativa de Propriedades Geoambientais de Camadas Impermeabilizantes de Solos Tropicais. Tese de Doutorado em Geotecnia, Brasília, DF, 257 p. Disponível em:<<http://www.geotecnia.unb.br/index.php?p=posgrad&pos=teses>>. Acesso em jan de 2011.

NASCENTES, R.; AZEVEDO, I. C. D.; JESUS, S. C.; FONSECA NETO, F. D.; TIBANA, S.; GUIMARÃES, L. M.; PORTELINHA, F. H. (2009). Coeficiente de difusão de nitrato e potássio em solo fertirrigado com vinhaça. *Revista Luso Brasileira de Geotecnia*. n° 117. pp. 43-70. Disponível em:<[http://www.dec.ufv.br/modules/mastop\\_publish/files/PublicacoesdoPrograma/IZABEL\\_Artigo\\_RevistaGeotecnia\\_Azevedo.pdf](http://www.dec.ufv.br/modules/mastop_publish/files/PublicacoesdoPrograma/IZABEL_Artigo_RevistaGeotecnia_Azevedo.pdf)>. Acesso em julho de 2014.

NETO, J. A. L.; MIRANDA, J. H.; GRIGOLON, G. B.; KAMOGAWA, M. Y.; TEIXEIRA, M. B.; SILVA, N. F. Transporte e adsorção de nitrato e potássio em colunas de solo sob aplicação de vinhaça. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. (1995). Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos. São Paulo, Villibor. 213p.

SANTOS, A.B.; FAGERIA, N.K.; ZIMMERMANN, F.J.P. Atributos químicos do solo afetado pelo manejo da água e do fertilizante potássico na cultura de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campinas Grande, v.6, n.1, p.12-16, 2002.

SPERLING, V. M. (2005). Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, 1 vol., 452 p. v.11, n°6, p. 1797 - 1803, 2017.

Recebido em 08 de dezembro de 2017.

Aprovado em 03 de julho de 2018.