



REVISTA AIDIS

de Ingeniería y Ciencias Ambientales:
Investigación, desarrollo y práctica.

ANÁLISE DE ASPECTOS AMBIENTAIS DA TECNOLOGIA DE EVAPORAÇÃO APLICADA AO TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO

*Débora Machado de Oliveira¹
Haical Sajovic Haddad²
Armando Borges de Castilhos Jr.²

ENVIRONMENTAL ANALYSIS OF THE EVAPORATION
TECHNOLOGY APPLIED TO TREATMENT OF LEACHATE LANDFILL

Recibido el 6 de abril de 2011; Aceptado el 8 de noviembre de 2011

Abstract

This study aimed to investigate the possible environmental impacts associated with the evaporation technology of landfill leachate. For this reason, experiments were performed at the laboratory scale in order to evaluate the quality of effluent resulted from the process. The experiment was conducted in two stages. The objective of the first stage was to diagnose the behavior of some pollutants into the process of evaporation/distillation. The results of this stage indicated that the process was effective with respect to the removal of COD, TOC, Cl⁻, and TS. By contrast, higher concentrations of NH₃ (4,125 mg.L⁻¹) were transferred to the condensate. From this standpoint, a second stage was conducted in order to evaluate the potential of NH₃ and H₂S emissions of the gases evaporated from the process of evaporation. The results from this stage showed high concentrations of NH₃ in the gas, reaching concentrations close to 1,555 mg.m⁻³. The presence of H₂S, on the other hand, was not detected in the gases.

Key Words: leachate, evaporation/distillation, environmental impacts

¹ Departamento de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis, Universidade Federal da Fronteira Sul

² Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina

*Corresponding author: Universidade Federal da Fronteira Sul - Campus Cerro Largo. Departamento de Engenharia Ambiental e Energias Renováveis. Rua João Sebastiany, 16 - CEP 97900-000. Cerro Largo, Rio Grande do Sul, Brasil.
Email: debora.machado@uffs.edu.br

Resumo

Este estudo teve como objetivo investigar os possíveis impactos ambientais associados à tecnologia de evaporação de lixiviado de aterro sanitário. Para isso, foram realizados experimentos em escala de laboratório visando avaliar a qualidade dos efluentes produzidos no processo. O estudo foi realizado em duas etapas distintas. A primeira etapa teve como objetivo diagnosticar o comportamento de alguns poluentes resultantes do processo de evaporação/destilação. Os resultados desta etapa indicaram que o tratamento por evaporação foi eficiente no que tange à remoção de DQO, COT, Cl^- e ST. No entanto, elevadas concentrações de NH_3 (4.125 mg.L^{-1}) foram arrastadas para os condensados. A partir dessa constatação, uma segunda etapa experimental foi conduzida para avaliar o potencial de emissão de NH_3 e H_2S nos gases resultantes do processo de evaporação. Os resultados desta segunda etapa revelaram altas concentrações de NH_3 nos gases, atingindo valores em torno de 1.555 mg.m^{-3} . A presença de H_2S , por outro lado, não foi detectada nos gases de evaporação.

Palavras-Chave: lixiviado, evaporação/destilação, impactos ambientais

Introdução

Lixiviado é definido como efluente aquoso gerado em consequência da percolação da água da chuva através da massa de resíduos, de processos bioquímicos que ocorrem no interior da célula de resíduos e da própria umidade dos resíduos. Muitos compostos orgânicos e inorgânicos podem estar presentes em lixiviados de aterros sanitários (El-Fadel et al., 1997; Kjeldsen et al., 2002). Öman e Junestedt (2008) analisaram amostras de lixiviados de 12 aterros sanitários e detectaram a presença de mais de 90 compostos orgânicos e organometálicos, e 50 compostos inorgânicos. Entre estes, um grande número de compostos perigosos como os policíclicos aromáticos, halogenados, fenóis, pesticidas, metais pesados e amônia. Portanto, em face desse panorama de compostos presentes nos lixiviados de aterros sanitários, aliado aos crescentes níveis de exigências da legislação ambiental, há necessidade urgente de estudos focados em novas tecnologias de tratamento, bem como no aperfeiçoamento dos sistemas de tratamento utilizados tradicionalmente.

Diversas técnicas têm sido propostas nas últimas décadas para o tratamento e remoção dos contaminantes presentes nos lixiviados. Apesar de uma série de etapas serem necessárias, os tratamentos biológicos (Im et al. 2001; Chen et al., 2008; Yang e Zhou, 2008) e físico-químicos (Marttinen et al., 2002; Wu et al., 2004; Pi et al. 2009) convencionais demonstram ser eficientes para a redução de substâncias orgânicas e amônia. No entanto, a remoção desses poluentes apresenta dificuldade em atender os padrões de lançamento em corpos receptores devido à complexidade dos lixiviados. Neste cenário, ganham importância os estudos sobre novas tecnologias para o tratamento de lixiviado, sendo a aplicação da evaporação uma alternativa que vem sendo estudada mais recentemente (e.g. Marks et al., 1994; Birchler et al., 1994; Di Palma et al., 2001; Xu et al., 2006; Yue et al., 2007). Birchler et al. (1994) afirmaram que o tratamento de lixiviados por evaporação pode produzir um condensado com melhor qualidade

e de mais fácil disposição que os efluentes provenientes de tratamentos convencionais, além de o concentrado residual reduzir-se a uma pequena fração do volume inicial a ser tratado. Com relação aos compostos orgânicos voláteis, amônia e ácidos orgânicos voláteis carregados para o condensado durante a evaporação, Birchler et al. (1994) e Eisner et al. (1996) indicaram o ajuste de pH como um mecanismo de controle eficiente.

Estudos mais recentes têm indicado que o tratamento por evaporação pode ser eficaz na remoção de compostos orgânicos, amônia e substâncias húmicas de lixiviados (Di Palma et al., 2002; Lee et al., 2003). Embora o tratamento por evaporação seja eficiente na separação de substâncias húmicas nos lixiviados, alguns compostos orgânicos voláteis e amônia poderão ser carregados juntamente com o vapor, resultando em poluição atmosférica (Yue et al., 2007). Para controle e tratamento dos vapores contendo COV e amônia, Yue et al. (2007) sugerem a incineração como alternativa mais adequada, embora seja um tratamento de alto custo e elevado consumo de energia.

Dentro dessa problemática, este estudo teve como objetivo aprofundar no entendimento do processo de evaporação como uma tecnologia alternativa para o tratamento de lixiviado. A análise da qualidade dos efluentes resultantes do processo de evaporação (condensados e concentrados) foi realizada visando a identificar os compostos de maior preocupação em termos de poluição atmosférica. Para elucidar ainda mais esta questão, foram realizados experimentos para identificação de compostos inorgânicos voláteis passíveis de serem transferidos da fase líquida para a fase gasosa pelo aquecimento do lixiviado.

Materiais e métodos

Origem dos lixiviados

Os lixiviados utilizados tiveram a sua origem em três aterros sanitários distintos, todos localizados num raio de 200 km da cidade Florianópolis, capital do estado de Santa Catarina, Brasil. Neste estudo, os lixiviados foram denominados de A, B e C, conforme a origem.

Experimentos de evaporação/destilação

O aparato experimental utilizado para evaporação/destilação dos lixiviados foi constituído de: (a) uma manta aquecedora, marca FISATOM Modelo-202; (b) um balão para evaporação com três bocas curtas angulares, fundo redondo e capacidade para 2.000 mL; (c) uma coluna de destilação lisa; (d) um condensador de Liebig tipo liso, duas juntas; (e) um frasco lavador de gás adaptado, tipo dreschel, para coleta do condensado; (f) um controlador de temperatura digital marca DIST Modelo DS I-530, com termômetro digital acoplado para ajuste. No topo da coluna de destilação foi fixado um termômetro de escala decimal. A representação esquemática do aparato experimental utilizado neste estudo é apresentada na Fig. 1.

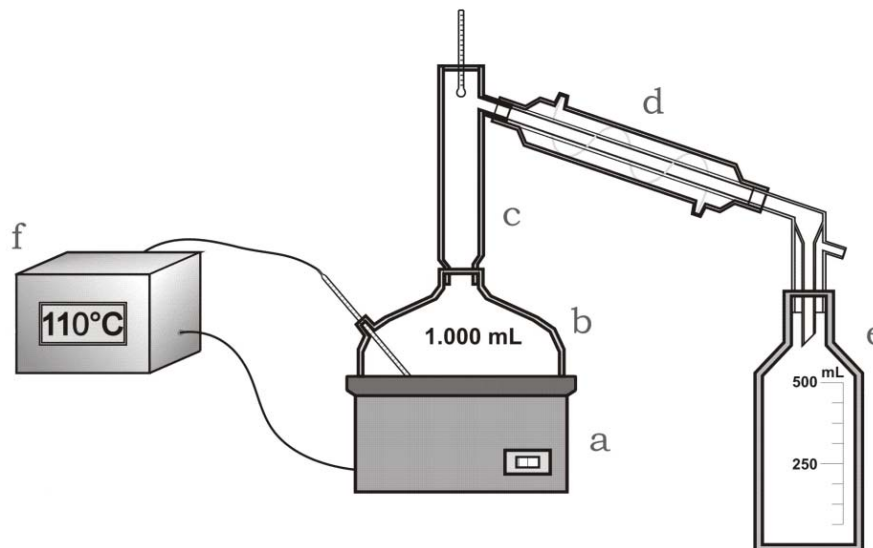


Figura 1. Representação esquemática do aparato experimental: (a) manta aquecedora; (b) balão de evaporação; (c) coluna de destilação; (d) condensador; (e) frasco armazenador do efluente condensado; (f) controlador de temperatura

A primeira etapa teve como objetivo verificar a qualidade dos efluentes (condensado e concentrado). Para isso, foi fixado como parâmetro o volume a ser evaporado (500 mL) em relação ao volume inicial de lixiviado bruto de 1.000 mL. No total, foram realizados 9 ensaios de evaporação/destilação em batelada utilizando o lixiviado A. Os efluentes (concentrado e condensado) foram avaliados sob os seguintes aspectos: Demanda Química de Oxigênio (DQO), Carbono Orgânico Total (COT), Nitrogênio Amoniaco (NH_3), Cloretos (Cl^-), Alcalinidade (CaCO_3), Sólidos Totais (ST), Sólidos Fixos Totais (SFT) Sólidos Voláteis Totais (SVT), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT), Sólidos Suspensos Totais (SST).

Procedimento para coleta e análise de NH_3 e H_2S

O aparato experimental foi planejado para coleta de dois gases inorgânicos voláteis de forma simultânea (NH_3 e H_2S). Para montagem deste experimento, foram necessários os seguintes equipamentos e materiais: (a) uma chapa elétrica com controle de temperatura; (b) balão volumétrico com três bocas curtas angulares, fundo chato e capacidade para 3.000 mL; (c) 5 frascos tipo dreschel; d) uma bomba a vácuo; (e) um medidor de fluxo digital; (f) mangueiras de silicone; (g) solução absorvente HgCl_2 (4 g.L^{-1}) e solução absorvente de HCl (0,1 M).



Figura 2. Aparato experimental para coleta dos gases de evaporação

O procedimento de coleta dos gases envolveu o aquecimento de 1.500 mL de lixiviado até a temperatura de 100 °C, sendo na sequência acionada a bomba a vácuo para conduzir os gases gerados pelo processo de evaporação através das soluções absorventes. Duas soluções absorventes foram empregadas, sendo uma de HCl 0,1 M para absorção de NH₃ (250 mL) e a outra HgCl₂ a concentração de 4 g.L⁻¹ (250 mL) para absorção de H₂S. O primeiro frasco dreschel teve função de condensar os vapores de água arrastados juntamente com os gases e, entre os frascos contendo as soluções absorventes, foram intercalados frascos vazios a fim de impedir possíveis contaminações pelo refluxo das soluções. Antes de cada experimento a bomba a vácuo teve seu fluxo calibrado, com um bolhômetro digital para uma vazão de 120 L.h⁻¹. Cada experimento teve duração de 2 horas contadas a partir do acionamento a bomba. Foram realizados 17 ensaios para o lixiviado B e 8 para o Lixiviado C. O ajuste de pH para 4 antes de cada experimento foi efetuado com adição de HCl 2M.

Para as análises das concentrações de H₂S na solução de HgCl₂, utilizou-se a metodologia proposta por Maris & Laplanche (1994), baseada no princípio de precipitação dos compostos de enxofre na forma de sulfetos e quantificação por gravimetria, utilizando membrana de acetato com porosidade de 0,45 µm previamente seca em estufa a 105 °C entre 14 a 16 horas. A equação (1) foi utilizada para cálculo da concentração de H₂S nos gases evaporados.

$$C_{H_2S} (mg.m^{-3}) = \frac{m (mg) \cdot 32(g.mol^{-1})}{326 (g.mol^{-1}) \cdot V (m^3)} \quad \text{Equação (1)}$$

Sendo:

C: concentração de H₂S (mg.m⁻³); m: massa do precipitado obtido em 250 ml de HgCl₂; V: volume do gás que passou na solução de cloreto de mercúrio; 32: massa molecular do enxofre; 326: massa do precipitado sulfeto de mercúrio (HgS) por mol de cloreto de mercúrio.

Para as análises da concentração de NH_3 na solução absorvente de HCl 0,1 M, utilizou-se a metodologia 4500- NH_3 , Método Titulométrico do *Standard Methods* (APHA, 2005), que consiste na destilação e posterior titulação com H_2SO_4 . A equação (2) foi utilizada para cálculo da concentração de NH_3 nos gases evaporados:

$$C_{\text{NH}_3} (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}) = \frac{m (\text{mg})}{V (\text{m}^3)} \quad \text{Equação (2)}$$

Sendo:

C: concentração de NH_3 ($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$); m: massa de amônia obtida em 250 ml de HCl 0,1 N; V: volume de gás succionado

Métodos analíticos

Os procedimentos de coleta, preservação e análises físico-químicas foram realizados segundo o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2005). Os métodos e equipamentos empregados nesta pesquisa para a caracterização das amostras de lixiviado bruto e efluentes do processo de evaporação (condensados e concentrados) são descritos na sequência: pH, método eletrométrico e pHmetro ALFAKIT/AT-310; DQO, método colorimétrico, refluxo fechado e espectrofotômetro HATCH/DR-4000U; COT, método por combustão e TOC-V SHIMADZU/CPH; N-NH_3 , método de destilação/titulometria e destilador VELP/UDK-132; Cl^- , potenciométrico e analisador de íons seletivos ORION/720A; Condutividade, condutímetro LUTRON/CD-430; Alcalinidade, método titulométrico e pHmetro ALFAKIT/AT-310; Sólidos, método gravimétrico e balança eletrônica analítica SHIMADZU/AY-220.

Resultados e discussões

Caracterização das amostras de lixiviado bruto

Os resultados da caracterização das amostras dos lixiviados A, B e C são apresentados na Tabela 1. Os lixiviados A e C são oriundos de aterros sanitários mais novos, enquanto que o lixiviado B provém de um aterro com mais de 10 anos de operação. O pH dos lixiviados revela que o lixiviado B possui um pH mais elevado, indicando que este se encontra em fase mais avançada de maturação.

A concentração de DQO ($> 3.000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) nos três lixiviados, indica que se encontram em fase metanogênica de degradação. Segundo Stegmann (2005), concentrações médias de DQO na faixa de $3.400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ são típicas de lixiviados de fases intermediária de degradação.

Tabela 1. Caracterização dos lixiviados brutos (A, B e C) utilizados nos experimentos

Parâmetros	Un.	Lixiviado A*		Lixiviado B**		Lixiviado C***
		Média	σ	Média	σ	Média
pH	-	7,9	0,09	8,46	0,33	7,7
Condutividade	mS	15,4	1,36	14,2	3,1	19
DQO	mg.L ⁻¹	3.174	1.766	3.353	1.089	3.430
COT	mg.L ⁻¹	1.485	834	-	-	-
DBO	mg.L ⁻¹	-	-	1.049	712	1.250
NH ₃	mg.L ⁻¹	1.839	673	1.298	531	918
Cloretos	mg.L ⁻¹	3.781	2.648	-	-	68
Alcalinidade (CaCO ₃)	mg.L ⁻¹	9.766	2.523	-	-	-
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	9.628	3.341	6.280	3.107	830
Sólidos Fixos Totais	mg.L ⁻¹	8.036	2.317	-	-	-
Sólidos Voláteis Totais	mg.L ⁻¹	1.820	568	-	-	-
Sólidos Dissolvidos	mg.L ⁻¹	9.876	2.272	-	-	-
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	855	376	-	-	-

*lixiviado A n = 9; **lixiviado B n = 5; ***lixiviado C n = 1; σ - desvio padrão

As análises físico-químicas revelam que o lixiviado A apresenta maior capacidade de biodegradação em relação aos outros dois. A relação entre COT/DQO no caso do lixiviado A ficou em torno de ($\sim 0,40$), enquanto que a relação entre DBO/DQO para os lixiviados B e C foi de ($\sim 0,31$) e ($\sim 0,36$), respectivamente. Segundo Mahler et al. (2005) razões de DBO/DQO na faixa de 0,5 são atribuídas a lixiviados oriundos de aterros jovens, enquanto que razões da ordem de 0,0005-0,2 são típicos para aterros antigos.

As análises de caracterização também revelam valores significantes de NH₃ em todos os lixiviados, variando de 918 a 1.839 mg.L⁻¹. Christensen et al. (2001) reportaram concentrações semelhantes a deste estudo, na faixa entre 500 e 2.000 mg.L⁻¹ em 12 investigações independentes com lixiviados de aterros sanitários. Öman e Junestedt (2008), por outro lado, caracterizaram 12 lixiviados na Suécia e apresentaram valores bastante inferiores ao deste estudo, uma média de 180 mg.L⁻¹ para NH₃. Mahler et al. (2005), após terem analisado as características de lixiviados de seis aterros sanitários localizados em diferentes regiões do Brasil, constataram que, devido ao alto conteúdo de material orgânico ($\sim 60\%$) presente nos resíduos sólidos brasileiros, os lixiviados em geral contêm altas concentrações de nitrogênio amoniacal.

No presente estudo, as amostras do lixiviado A apresentaram grandes variações de Cl⁻ (2.000 a 6.430 mg.L⁻¹). Segundo Linde e Jönsson (1995), elevadas concentrações de Cl⁻ são esperadas para lixiviados provenientes de aterros sanitários novos e meia idade. Nos lixiviados A e B, observa-se um valor elevado de Sólidos Totais, em torno de 9 g.L⁻¹ e 6 g.L⁻¹, respectivamente. Sendo que a maior fração de sólidos no lixiviado A está presente na forma dissolvida, o que dificulta a clarificação do lixiviado por processos de sedimentação simples.

As características destacadas acima identificam que os lixiviados em estudo podem ser classificados como estando na fase metanogênica. Dos três lixiviados analisados, o lixiviado A foi o que apresentou características mais próximas de um lixiviado jovem. Segundo Renou et al. (2008), o crescente envelhecimento dos aterros, produzindo cada vez mais lixiviados estabilizados, constitui um problema para os sistemas de tratamento convencionais (biológico ou físico-químicos), visto que, em função das características do lixiviado, estes não conseguem mais ser suficientes para atingir o nível de purificação desejado. Neste caso, há a necessidade de um sistema de tratamento mais elaborado para assegurar a qualidade do efluente tratado.

Qualidade dos efluentes do processo de evaporação/destilação de lixiviado

A Tabela 2 mostra a concentração média e o desvio padrão dos poluentes no lixiviado bruto, concentrado e condensado resultantes do processo de evaporação/destilação.

Tabela 2. Análise da qualidade dos efluentes (concentrado e condensado) do processo de evaporação

Parâmetros	Unidade	Lixiviado Bruto			Concentrado			Condensado		
		<i>n</i>	Média	σ	<i>n</i>	Média	σ	<i>n</i>	Média	σ
pH	-	9	7,9	0,1	9	10,0	0,4	9	9,1	0,1
DQO	mg.L ⁻¹	9	3.174	1.766	9	6.603	1.591	9	131	50
COT	mg.L ⁻¹	6	1.485	834	9	2.428	380	4	171	92
N-NH ₃	mg.L ⁻¹	9	1.839	673	9	10	3	9	4.125	592
Cl ⁻	mg.L ⁻¹	9	3.781	1.324	9	6.300	2.553	9	151	68
Condutividade	$\mu\text{S.cm}^{-1}$	9	15.430	1.364	9	14.784	559	9	15.369	440
Alcalinidade (CaCO ₃)	mg.L ⁻¹	9	9.766	2.523	9	4.652	1.025	9	15.024	708
Sólidos Totais	mg.L ⁻¹	9	9.856	2.815	9	20.998	3.204	9	88	67
Sólidos Fixos Totais	mg.L ⁻¹	9	8.036	2.317	9	17.533	2.757	8	36	65
Sólidos Voláteis Totais	mg.L ⁻¹	9	1.820	568	9	3.465	938	9	64	44
Sólidos Dissolvidos	mg.L ⁻¹	6	8.259	3.492	9	19.145	2.934	9	69	65
Sólidos Suspensos	mg.L ⁻¹	6	912	704	9	1.853	535	8	21	15

σ - desvio padrão; *n* - número de amostras

A Tabela 2 demonstra que a maior parte dos poluentes analisados permaneceu no concentrado (DQO, COT, Cl⁻, ST, SFT, SVT, SDT e SST). Entretanto, a NH₃ foi quase na sua totalidade transferida para o condensado (4.125 mg.L⁻¹), isso ocorre, em parte, devido ao pH da amostra de lixiviado estar em torno de 7,9 o que favorece a presença de espécies de amônia na sua forma volátil. Os resultados obtidos a partir deste estudo corroboram os dados obtidos por Aguiar e Vignoli (2007), que mensuraram valores de NH₃ na faixa entre 3.100 e 3.950 mg.L⁻¹ nas frações equivalentes a 25% do volume inicial evaporado/destilado. Xu et al. (2006), em experimento similar, obtiveram concentrações de NH₃ na faixa de 1.660 mg.L⁻¹ no condensado. Além da NH₃, é possível verificar que uma parcela de compostos orgânicos, expressos em

termos de DQO e COT, também foi arrastada juntamente com os vapores, indicando a presença de compostos orgânicos voláteis no lixiviado estudado.

Para visualizar com maior clareza o comportamento dos poluentes face ao processo de evaporação/destilação foi construído um balanço de massa (Figura 3). Pelo balanço de massa, pode-se observar que valores inferiores a 2% de DQO e 6% de COT foram carreados para os efluentes condensados. Esses resultados são comparáveis com aqueles encontrados por Birchler et al. (1994) para um experimento de evaporação conduzido em escala de laboratório, em que 98% da DQO permaneceu no concentrado, embora a concentração inicial de DQO (165 mg.L^{-1}) tenha sido bastante inferior à do presente estudo. Os resultados apresentados por Amsoneit (1985) se semelham aos analisados neste estudo em termos de remoção de DQO e COT. Para a DQO, Amsoneit (1985) obteve uma remoção na ordem de 97% e atingiu um valor baixo de COT (68 mg.L^{-1}) no condensado, embora o processo de evaporação utilizado pelo autor tenha sido realizado em duas fases. A fração de massa para o COT alcançada por Di Palma et al. (2002) foi de apenas 1% no condensado, enquanto neste estudo obtiveram-se valores da ordem de 6% de COT no condensado.

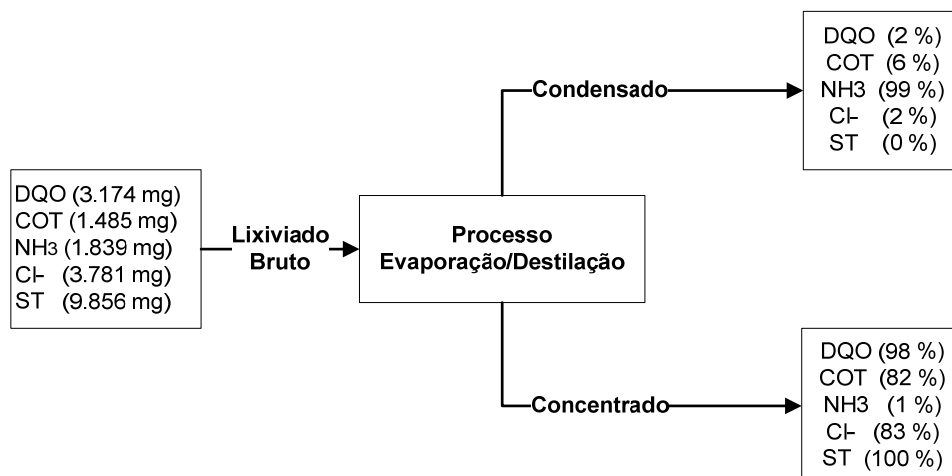


Figura 3. Balanço de massa dos principais poluentes analisados no processo de evaporação/destilação

A Figura 3 também demonstra que a NH₃ quase que na sua totalidade, ou seja, 99% da fração em massa, foi transferida para o condensado. O resultado do balanço de massa para os ST mostrou que próximo de 100% do total permaneceu no concentrado, valor que representa 21.000 mg.L^{-1} ; enquanto que menos de 0,5% foi carreado para o condensado (88 mg.L^{-1}). O baixo valor encontrado para sólidos no condensado foi igualmente reportado por Ettala (1998), em evaporador do tipo filme em escala real.

Emissão de compostos inorgânicos voláteis (NH₃ e H₂S)

O potencial de emissão dos gases de NH₃ no sistema estudado indicou uma concentração extremamente preocupante do ponto de vista ambiental, porém em nenhuma das análises foi detectada a presença de sulfeto de hidrogênio (H₂S). Os resultados de concentração de amônia obtidos para os dois lixiviados podem ser observados na Tabela 3.

Tabela 3. Emissões de amônia (NH₃) liberadas nos ensaios de evaporação

Amostra de Lixiviado	Lixiviado B			Lixiviado C		
	<i>n</i>	Média	σ	<i>n</i>	Média	σ
N-NH ₃ (mg.m ⁻³)						
Sem ajuste pH	10	914	610	4	1.555	803
Com ajuste pH (4,00)	7	15	20	4	19	16

Pode-se observar que a evaporação de lixiviado resulta na liberação de altas concentrações de amônia para a fase gasosa, isso se dá em virtude de que o pH do lixiviado, normalmente alcalino na fase metanogênica, favorece a presença da forma não ionizada da amônia (NH₃) e, portanto, mais volátil. O ajuste do pH para 4 nos lixiviados antes do processo de evaporação resultou na redução significativa das emissões de NH₃, porém, vale ressaltar que mesmo com o ajuste de pH para nível 4, em alguns ensaios as concentrações ultrapassaram o limite de tolerância de 14 mg.m⁻³ estabelecido pela Norma Regulamentadora Brasileira (NR15) para exposição ocupacional para um regime de trabalho de 48 h/semana. Por outro lado, não foi possível detectar concentrações de H₂S nos vapores liberados pelo processo de evaporação de lixiviado. A razão disso pode estar associada à escolha da metodologia, a qual não foi suficiente para detectar frações pequenas de H₂S nos vapores.

Conclusões e recomendações

O presente estudo revelou que o tratamento de lixiviado pelo processo de evaporação é eficiente na remoção de poluentes não voláteis, como no caso de ST, Cl⁻, DQO e COT. Contudo, é necessária uma avaliação cuidadosa do tipo de composto orgânico volátil que está sendo transferido para a atmosfera, uma vez que alguns compostos orgânicos podem ser altamente impactantes, mesmo em pequenas concentrações. Além disso, lixiviados oriundos de aterros jovens podem conter elevadas concentrações de ácidos orgânicos voláteis que, se submetidos ao processo de evaporação, serão facilmente transferidos para a fase gasosa e, conseqüentemente, gerarão poluição atmosférica.

A grande preocupação que se apresenta neste estudo, porém, está relacionada aos níveis elevados de amônia nos lixiviados brutos e a sua transferência total para a fase gasosa em virtude do aquecimento do lixiviado. Esse fato é preocupante do ponto de vista ambiental e da

saúde humana, pois concentrações superiores a 1.500 mg.m^{-3} foram mensuradas em vapores liberados pelo lixiviado C, quando submetido ao aquecimento em temperatura de $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Experimentos realizados com ajuste de pH para 4 indicaram a possibilidade de reduzir a emissão de amônia para os vapores. Valores de emissão em torno de 15 a 19 mg.m^{-3} foram alcançados com o ajuste de pH para 4. No entanto, essas concentrações, ainda que reduzidas, são superiores ao limite de tolerância de 14 mg.m^{-3} estabelecido pelas normas brasileiras (NR 15) para exposição ocupacional para um regime de trabalho de 48 h/semana.

Face aos resultados encontrados, os autores recomendam o aprofundamento no estudo da tecnologia de evaporação aplicada ao tratamento de lixiviado, visando a novos enfoques de estudo, como a identificação dos compostos orgânicos voláteis passíveis de serem transferidos para a atmosfera, bem como a avaliação da viabilidade econômica da acidificação do lixiviado como forma de redução das emissões de amônia.

Agradecimentos. Os autores agradecem ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pelo financiamento do projeto.

Referências bibliográficas

- Aguiar, A. R. M. P.; Vignoli, C. N. (2007) Monitoramento de parâmetros ambientais do processo de evaporação de choroume. In: *24° Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brasil.
- Amsoneit, N. (1985) Eindampfen problematischer deponie-sickerwässer. *Wlb, wasser, luft und betrieb* **10**, p. 63-66.
- APHA - American Public Health Association. (2005) *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 21 th ed. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation, Washington, DC.
- Birchler, D. R.; Milke, M. W.; Marks, A. L.; Luthy, R. G. (1994) Landfill Leachate Treatment by Evaporation. *Journal of Environmental Engineering, ASC*, **120**(5), p. 1109-1131.
- Chen, S.; Sun, D.; Chung, J. (2008) Simultaneous removal of COD and ammonium from landfill leachate using an anaerobic-aerobic moving-bed biofilm reactor system. *Waste Management*, **28**(2), p. 339-346.
- Christensen, T. H.; Kjeldsen, P.; Bjerg, P. L.; Jensen, D. L.; Christensen, J. B.; Baun, A.; Albrechtsen, H. J.; Heron, G. (2001) Biogeochemistry of landfill leachate plumes. *Applied Geochemistry*, **16**(7-8), p. 659-718.
- Di Palma, L.; Ferrantelli, P.; Merli, C.; Petrucci, E. (2002) Treatment of industrial landfill leachate by means of evaporation and reverse osmosis. *Waste Management*, **22**(8), p. 951-955.
- Eisner, P.; Leonhard, K.; Wilderer, P. A. (1996) Landfill Leachate Treatment by Evaporation. *Journal of Environmental Engineering*, **22**(2), p. 163-164.
- El-Fadel, M.; Findikakis, A. N.; Leckie, J. O. (1997) Environmental impacts of solid waste landfilling. *Journal of Environmental Management*, **50**(1), p. 1-25.
- Ettala, M. Full-Scale Leachate Treatment Using New Evaporation Technology. (1998) *Practice Periodical of Hazardous, Toxic and Radioactive Waste Management*, **2**(2), p. 86-87
- Im, J-H.; Woo, H-J.; Choi, M-W.; Han, K-B.; Kim, C-W. (2001) Simultaneous organic and nitrogen removal from municipal landfill leachate using an anaerobic-aerobic system. *Water Research*, **35**(10), p. 2403-2410.

- Kjeldsen, P.; Barlaz, M. A.; Rooker, A. P.; Baun, A.; Ledin, A.; Christensen, T. H. (2002) Present and long-term composition of municipal solid leachate. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, **32**(4) p. 297-336.
- Lee, H. C.; Kang, G.; Lee, Y. P.; Han, H. S. and Stevens, D. K. (2003) Development of an advanced evaporation System with fouling-free technology using a circulating fluidized bed heat exchanger. *Environmental Engineering Science*, **20**(4) p 319-327.
- Linde, K.; Jönsson, A. S. (1995) Nanofiltration of salt solutions and landfill leachate. *Desalination*, **103** (3), p. 223-232.
- Marks, A. L.; Luthy, R. G.; Diwekar, U. M. (1994) Semi-Continuous Evaporation Model for Leachate Treatment Process Evaluation. *Environmental Progress*, **13**(4), p 278-289.
- Mahler C.; Ferreira M. A.; Günther, W. (2005) Studies of landfill leachate in Brazil In: *Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October, 2005.
- Maris, C. e A. Laplanche. (1994) Analyse globale des mercaptanas et de l'hydrogène sulfurédans l'air par gravimétrie. *Rapport de recherche* (1), Juin, 1994.
- Martinen, S. K.; Kettunen, R. H.; Sormunen, K. M.; Soimasuo, R. M.; Rintala, J. A. (2002) Screening of physical-chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates. *Chemosphere*, **46**(6), p.851-858.
- Norma Regulamentadora 15. Atividades e operações insalubres. Anexo n. 11 - Agentes químicos cuja insalubridade é caracterizada por limite de tolerância e inspeção no local de trabalho. Acesso em 01.04.2011. Disponível em: <http://www.mte.gov.br/legislacao/normas_regulamentadoras/nr_15_anexo11.pdf>
- Öman, C. B.; Junestedt, C. (2008) Chemical characterization of landfill leachates – 400 parameters and compounds. *Waste Management & Research*, **28**(10), p. 1876-1891.
- Pi, K. W.; Li, Z.; Wan, D. J.; Gao, L. X. (2009) Pretreatment of municipal landfill leachate by a combined process. *Process Safety and Environmental Protection*, **87**(3), p. 191-196.
- Renou, S.; Givaudan, J. G.; Poulain, S.; Dirassouyan, F.; Moulin, P. (2008) Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *Journal of Hazardous Materials*, **150**(3), p. 468–493.
- Stegmann, R.; Heyer, K. U. et al. (2005) Leachate Treatment. In: *Proceedings Sardinia 2003, Ninth International Waste Management and Landfill Symposium*. S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy; 3 - 7 October, 2005.
- Wu, J. J.; Wu, C-C.; Ma, H-W.; Chang, C-C (2004) Treatment of landfill leachate by ozone-based advanced oxidation processes. *Chemosphere*, **54**(7), p. 997-1003.
- Xu, Y-D.; Yue, D-B.; Zhu, Y.; Nie, Y-F. (2006) Fractionation of dissolved organic matter in mature landfill leachate and its recycling by ultrafiltration and evaporation combined processes. *Chemosphere*, **64**(6), p. 903-911.
- Yang, Z.; Zhou, S. (2008) The biological treatment of landfill leachate using a simultaneous aerobic and anaerobic (SAA) bio-reactor system. *Chemosphere*, **72**(11) p. 1751-1756.
- Yue, D.; Xu, Y.; Mahar, R. B.; Liu, F.; Nie, Y. (2007) Laboratory-scale experiments applied to the design of a two-stage submerged combustion evaporation system. *Waste Management & Research*, **27**(5), p. 704-710.