REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONIACAL DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO POR STRIPPING EM SISTEMA FECHADO

Caio Victor Lourenço Rodrigues[(1)]
Engenheiro Civil formado pela Universidade Estadual de Londrina e mestrando em Saneamento pela mesma instituição. Desenvolveu trabalho de iniciação cientifica e de conclusão de curso na linha de tratamento de lixiviado de aterro sanitário.
Deize Dias Lopes
Profa. Associada do Departamento de Construção Civil/CTU/UEL

Endereço[(1)]**:** Av. Juscelino Kubitschek, 1479 apto 202 - Centro - Londrina - PR - CEP: 86020-000 – caio.vl.rodrigues@gmail.com

RESUMO

O lixiviado é um dos efluentes gerados em aterro sanitário, o qual, devido ao seu potencial poluidor, deve receber o tratamento adequado. Apesar da variabilidade em suas características qualitativas, pode-se caracterizá-lo de modo geral, pela elevada presença de nitrogênio e matéria orgânica. A remoção do nitrogênio pode ocorrer através de tratamentos biológicos ou físico-químicos, dependendo das características que esse apresenta e dos recursos disponíveis. Um tratamento físico-químico que pode ser utilizado é o stripping da amônia livre, ou seja, a volatilização do gás amônia, sendo este o objetivo do presente trabalho. O protótipo, em escalda de bancada, foi constituído basicamente por um tanque de arraste para a realização do stripping, em sistema fechado. O stripping da amônia livre pôde ser estudado sobre diferentes condições, com alterações geométricas do sistema e das características do lixiviado. Algumas bateladas realizadas chegaram a eficiência de 97% na remoção do nitrogênio amoniacal presente, semelhante a outros sistemas de tratamento por stripping em regime aberto. Por último, foi possível verificar como se dá o decaimento do n-amoniacal e da alcalinidade no meio ao longo do tratamento, e pode-se constar que realmente são proporcionais, sendo a eficiência da remoção do n-amoniacal dependente da quantidade de amônia livre presente.

PALAVRAS-CHAVE: Lixiviado, Nitrogênio Amoniacal, Gás amônia.

INTRODUÇÃO

No Brasil a principal forma de destinação dos resíduos sólidos é acomodação no solo, ou seja, em aterros sanitários, seguindo uma tendência mundial, onde países de economia mais modesta adotam essa medida, por ser de investimento inicial menor e assegurar de maneira adequada a minimização dos impactos ambientais.

Mesmo quando corretamente operados os aterros sanitários geram efluentes líquidos, lixiviado, e gasosos, como o metano, os quais devem receber a correta destinação a fim de se evitar problemas ambientais. Portanto para que um aterro sanitário apresente um bom funcionamento, esse deve contar com mecanismos que coletem, transportem e tratem esses efluentes de forma eficiente.

A decomposição dos resíduos nos aterros ocorre mediante uma combinação de processos físicos, químicos e biológicos, sendo os últimos dominantes. O conjunto desses processos recebe o nome de dinâmica de aterros (SOARES, 2006).

O lixiviado é um líquido escuro, com forte odor e grande potencial poluidor, que tem como principais poluentes a matéria orgânica e o nitrogênio. Por isso, quando lançado em corpos d'água tem como impacto mais imediato a redução do teor de oxigênio dissolvido, comprometendo assim a fauna e a flora (CHRISTENSEN et al., 2001; FENT, 2003 apud MORAIS, 2005).

Podem ainda fazer parte da constituição do lixiviado de aterros de resíduos sólidos domésticos, mas em menores concentrações, os metais, sulfetos, fósforo, cianeto, ácidos voláteis, carbono inorgânico e substâncias húmicas (KJELDSEN et al., 2002, citado por MARINGONDA, 2008).

As características do lixiviado de cada aterro variam de acordo com os resíduos recebidos, as condições climatológicas e hidrológicas do local, a forma de operação e possíveis pré-tratamentos dos resíduos, por isso nem sempre técnicas de tratamento de lixiviado eficazes em um aterro são eficientes também em outros.

É um consenso entre os autores brasileiros que o nitrogênio na sua forma amoniacal é o principal poluente do lixiviado a longo prazo, uma vez que a matéria orgânica tende a ser reduzida com o tempo e os metais a precipitarem quando o pH se eleva.

O nitrogênio presente no lixiviado, em sua maior parte, é originado da decomposição da matéria orgânica proteica. Outras fontes de nitrogênio em lixiviados, porém em menor escala, são os fertilizantes, produtos de limpeza e produtos para a preservação de madeira (FLECK, 2003).

A longo prazo o nitrogênio orgânico vai sendo convertido em nitrogênio amoniacal, que pode se tornar o componente mais significativo do lixiviado, esse ainda pode ser um dos responsáveis pelo forte odor do lixiviado, devido à liberação da amônia livre, mais conhecida como gás amoníaco, especialmente quando o pH do lixiviado estiver elevado (MARINGONDA, 2008).

O N-amoniacal é formado pelo íon amônio e a amônia livre. No meio aquoso o íon amônio se encontra em equilíbrio com a amônia livre, em função do pH e da temperatura do meio, conforme mostra a Equação 01. Segundo Souto (2009), a amônia tem caráter polar, por isso apresenta grande solubilidade e é responsável pela condutividade do meio.

$$\mathbf{NH_3 + H^+ \leftarrow\rightarrow NH_4^+} \qquad \text{Equação (1)}$$

Com o aumento da temperatura e/ou do pH o equilíbrio NH_3/NH_4, mostrado na Eq. 01, desloca-se para a esquerda, no sentido de formação da amônia livre. A fração de amônia livre pode ser determinada usando a Equação 02.

$$\text{amônia livre}\,(\text{mg}\,NH_3.L^{-1}) = \frac{17}{14}\frac{\text{N}-\text{amoniacal}.10^{pH}}{10^{pH}+e^{(6344/(273+t))}} \qquad \text{Equação (2)}$$

A amônia livre é volátil, portanto a remoção do nitrogênio amoniacal por stripping pode ser viável, em função da concentração deste na água residuária e dos valores de temperatura e, principalmente, do pH.

O stripping é um processo de transferência de massa que acelera a volatilização de compostos de uma fase líquida (lixiviado), para uma fase gasosa (atmosfera), fazendo-se um gás (ar) passar pelo líquido (lixiviado), sendo que esse gás não deve ser o composto a ser removido, no caso o gás amônia. Segundo Souto (2009), a passagem do ar pelo líquido é acelerada forçando-se o contato do líquido com um gás. Essa transferência de massa pode ser explicada pela lei de Henry, que segundo Huang e Shang (2006) a transferência ocorre pelo fato da concentração de poluentes no líquido ser maior que no ar.

À medida que a amônia livre vai sendo volatilizada gera-se um desequilíbrio momentâneo na solução, mas rapidamente restabelecido, de maneira que os íons amônio (NH_4^+) liberam íons H^+ e formam novas moléculas de amônia livre. Em um primeiro momento, segundo Von Sperling (1997), o íon H^+ não confere acidez ao meio devido ao sistema de tamponamento bicarbonato-gás carbônico.

A Equação 03 representa a reação entre o íon H^+ e o bicarbonato presente no meio, onde se pode observar que há consumo de alcalinidade pelo íon hidrogênio, sendo que para cada mg de N-NH_4^+, que se dissocia em H^+ e NH_3, 3,63 mg de alcalinidade são consumidos (VON SPERLING, 1997). Em alguns casos, a alcalinidade do meio é muito elevada e, por isso, mesmo havendo consumo de alcalinidade por parte do íon hidrogênio, a concentração desta é suficiente para que não ocorra redução do pH.

$$\mathbf{H^+ + HCO_3^- \leftrightarrow H_2O + CO_2} \qquad \text{Equação (3)}$$

O arraste de amônia no lixiviado pode remover entre 60 e 95% do nitrogênio amoniacal, não tendo qualquer efeito sobre as outras formas de nitrogênio (Metcalf & Eddy, 1991, apud Souto 2009), a eficiência será proporcional a quantidade de amônia livre presente, portanto é necessário o controle do pH e da temperatura.

Qasim e Chiang (1994) afirmam que o arraste de amônia é um processo confiável, com operação e manutenção relativamente fáceis, não colocando os operadores em risco, entretanto dependem de condições climáticas e pode poluir a atmosfera devido à liberação de compostos orgânicos voláteis. (SOUTO, 2009), inclusive a amônia livre.

O stripping pode ser dividido em dois grandes grupos: sistemas em que a fase líquida é contínua, havendo a dispersão da fase gasosa, e sistema em que a fase gasosa é contínua, havendo dispersão da fase líquida, também conhecidos como torres de arraste. O primeiro recebe o nome de tanque de arraste, que consiste em reservatórios dotados de aeradores, onde o borbulhamento de ar difuso ou a ação de agitadores mecânicos aumentam a superfície de contato gás/líquido, com isso há o aumento na transferência de massa através dessa interface (La Graga et al., 2001)

O aumento do pH e da temperatura favorece a formação de amônia livre e por seguinte a eficiência da remoção do nitrogênio por stripping do NH_3. Entretanto simplesmente promover o aumento desmedido do pH do lixiviado pode trazer conseqüências posteriores ao tratamento como um todo, principalmente se houver um tratamento biológico na seqüência, pois um meio muito alcalino inibe a atividade de algumas bactérias.

Silva (2002) e USEPA (2000) citam algumas vantagens e desvantagens da remoção do nitrogênio pelo stripping da amônia livre. As principais vantagens do stripping são: o controle mecânico que o sistema apresenta, bem como sua facilidade de operação; ele pode atingir níveis de remoção satisfatórios que enquadram o efluente em níveis de concentração de nitrogênio amoniacal exigidos pela legislação e seu funcionamento não é alterado devido à presença de substâncias tóxicas.

Algumas desvantagens aparecem em virtude do tipo de sistema de stripping adotado, as torres de arraste, por exemplo, merecem cuidados mais criteriosos, pois nelas pode haver incrustação de precipitados de ferro e carbonato de cálcio em suas paredes e tubulações. Em geral, em todas as formas de stripping deve ser feito o controle do pH e da temperatura, fatores limitantes do processo. Outra desvantagem que o stripping apresenta são os problemas que o gás amônia pode vir a causar no ambiente, devido a sua corrosividade e toxidade.

Diante do exposto, este trabalho tem por objetivo avaliar a remoção de N-amoniacal de lixiviado de aterro por meio do "stripping" da amônia livre, utilizando sistema do tipo tanque de arraste fechado, criando assim condições para que o gás amônia possa ser coletado, ao invés de lançá-lo na atmosfera. A avaliação se deu com variações geométricas no reator e nas características do lixiviado, com a alteração de alguns de seus parâmetros.

OBJETIVO

Como alternativa para a redução do nitrogênio de lixiviado de aterro sanitário, o objetivo desse trabalho foi estudar o stripping da amônia livre em de tanque de arraste fechado, como possibilidade para a recuperação do gás amônia.

MATERIAIS E MÉTODOS

Sistema experimental

Para que os objetivos do trabalho pudessem ser alcançados, foi desenvolvido um protótipo, em escala de bancada (Figura 1), sendo esse alterado em sua geometria ao longo das cinco bateladas realizadas, com a finalidade de avaliar a influência da geometria do reator no processo. As características geométricas de cada reator podem ser observadas na Tabela 1.

Além das alterações na geometria dos reatores, em algumas bateladas também foram alteradas as características do lixiviado, com alteração do pH e a adição de fonte externa de nitrogênio de amoniacal, sempre com objetivo de estudar a eficiência do stripping da amônia livre.

O stripping foi realizado através do uso de aeradores de aquário, onde esses promoviam a agitação do meio pela inserção de ar atmosférico na mistura, condições mínimas para que o stripping acontecesse. Os aeradores

funcionaram ininterruptamente durante o período de duração das bateladas. A taxa de aeração de cada um era próxima a 90 L/h.

Tabela 1 – Resumo das características dos reatores nas seis batealdas realizadas

Características	Bateladas					
	1	2	3	4	5	6
Volume Total (L)	1,2	1,2	3,3	9,0	9,0	9,0
Volume de Lixiviado (L)	0,8	0,8	2,5	5,0	5,0	5,0
Volume de ar (L)	0,4	0,4	0,8	4,0	4,0	4,0
Altura da coluna de ar (cm)	4,5	4,5	9,0	5,0	5,0	5,0
Formato	cil.	cil.	cil.	ret.	ret.	ret.
Área supecial (cm²)	63,6	63,6	143,1	680,0	680,0	680,0
Área específica (m²/m³)	7,95	7,95	5,72	13,6	13,6	13,6

Nas bateladas B1, B2 e B3, não houve alteração nas características do lixiviado, entretanto a geometria do reator na batelada B3 passou a ser diferente da apresentada na batelada B1, adotando-se um frasco com um volume maior de lixiviado e com uma maior coluna de ar entre a superfície do líquido e a tampa do recipiente, visando melhorar a eficiência do stripping. Além disso, para melhorar a distribuição do ar e evitar borbulhamento do lixiviado na saída da mangueira proveniente do aerador foi utilizada uma pedra porosa, similar às utilizadas em aquário.

As diferenças entre as bateladas B1 e B2, ficaram por conta do tempo de detenção hidráulica (THD), como pode-se observar na Tabela 2.

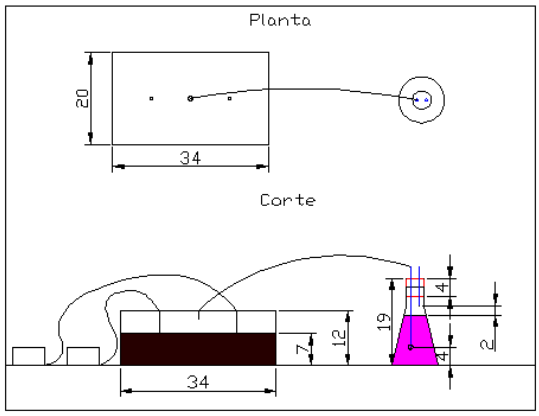


Figura 1 – Esquema do protótipo usado - as medidas referem-se às bateladas B4 e B5.

As bateladas B4 e B5 apresentaram tanto mudanças na geometria dos reatores, quanto nas características do lixiviado. Em ambas as bateladas o reator continuou sendo de plástico e com tampa de fechamento hermético, mas seu formato passou a ser retangular. Além disso, esses apresentavam maior área de contato entre o lixiviado e a atmosfera do reator, área superficial, a fim de melhorar a eficiência do stripping.

Devido a maior área superficial do reator, foi utilizado um divisor na mangueira do aerador, portanto dois pontos do tanque passaram a ser aerados de maneira uniforme. Assim como na terceira batelada, os dois pontos de aeração possuíam uma pedra porosa em sua ponta.

Após a realização da batelada B4, algumas observações foram feitas. O divisor utilizado na saída do aerador durante a batelada B4 não se comportou como esperado e foi substituído por dois aeradores.

Observou-se um problema na vedação da batelada B4, devido a incompatibilidade entre o material plástico da tampa e o a cola de silicone. Por isso optou-se por utilizar borracha esponjosa para complementar a vedação do protótipo na batelada B5, e evitar uma possível perda de gás amônia.

A batelada B6 teve como objetivo avaliar a remoção do nitrogênio ao longo do tempo do stripping. Para essa análise foram recolhidas várias amostras, com a finalidade de mostrar a evolução do tratamento por stripping

ao longo do tempo. O sistema foi mantido fechado ao longo do tempo, sendo aberto apenas para a coleta de amostras.

Desenvolvimento dos experimentos e monitoramento

O lixiviado utilizado foi proveniente do aterro controlado do município de Londrina-PR, em operação desde a década de 70, portanto com mais de 30 anos de atividade. A coleta foi realizada na entrada do sistema de tratamento do lixiviado. Em seguida o lixiviado foi transportado por um caminhão tanque até o laboratório de Saneamento da Universidade Estadual de Londrina onde foi armazenado em tanque de 5.000 L.

Para a realização das bateladas B1 e B3 o lixiviado foi utilizado sem nenhuma alteração em suas características iniciais, sendo o reator preenchido com o lixiviado bruto. Já nas bateladas B4, B5 e B6 decidiu-se por alterar as características do lixiviado bruto. Primeiramente foi acrescido ao efluente cloreto de amônia (NH_4Cl), com o objetivo de aumentar a concentração de nitrogênio amoniacal e, portanto, gerar uma maior quantidade de gás amônia. Outra modificação foi a elevação pH do lixiviado com a aplicação de NaOH (6N), pois quanto maior o pH, maior a eficiência do stripping. As características do lixiviado após as alterações são apresentadas no próximo item na Tabela 2.

O sistema foi operado em forma de batelada, ou seja, de maneira intermitente, com período de duração, ou seja, o tempo de detenção hidráulica (TDH), variando de batelada para batelada (Tabela 2) de acordo com a eficiência do stripping.

No início e ao final de cada batelada foram realizadas análises de alguns parâmetros do conteúdo do reator de stripping. Os parâmetros monitorados foram: alcalinidade, pH e nitrogênio amoniacal. Na batelada B3 foram realizados os testes de nitrato e nitrito na amostra final de lixiviado, ou seja, após o fim da batelada. O objetivo foi verificar se houve alguma atividade biológica e transformação do nitrogênio amoniacal em outras formas, no caso nitrito e nitrato.

As caracterizações do lixiviado feitas ao longo de toda a pesquisa foram realizadas de acordo com métodos padronizados por APHA (2005), exceto o nitrato, que foi usado o método do ácido salicilico (CATALDO, 1975).

Nas bateladas de 1 a 5 (B1; B2; B3; B4; B5) não foram coletadas amostras durante o período de andamento do ensaio. No entanto na batelada B6 foram coletas amostras durante o ensaio, neste caso para avaliar o decréscimo do N-amoniacal e de alcalinidade ao longo do tempo. Nesta as coletas foram realizadas com pipetas de 10 ou 25 ml inseridas no reator por um orifício feito em seu centro. As coletas das amostras foram realizadas a cada dois dias e os parâmetros monitorados foram os mesmos das bateladas anteriores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados dos parâmetros físico-químicos de cada batelada – início e final, bem como as eficiências de remoção e as relações com as principais caracteristicas físicas de cada sistema são aprasentados nas Tabelas 2 e 3.

As bateladas B1 e B2 apresentaram no stripping da amônia livre eficiêcnias de 66% e 63%, respectivamente. A única diferença apresentada nessas bateladas foi o TDH, entretanto essa variável não influenciou na eficiência do stripping, como poderá ser observado mais adiante.

Tabela 2 – Resultados do stripping da amônia livre obtidos nas cinco bateladas

Parâmetros	Bateladas					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
TDH (dia)	7	14	24	13	14	11
pH inicial	8,57	8,57	8,30	8,6	9,6	10,42
pH final	9,22	8,89	9,00	8,98	9,2	9,44
Alcalinidade inicial (mg $CaCO_3$/L)	3099	3275	3173	3023	5480	8900
Alcalinidade final (mg $CaCO_3$/L)	1956	2320	2243	1589	1955	3459
N-amoniacal inicial (mg N-NH_3/L)	473	370	448	925	1137	1578

N-amoniacal final (mg N-NH_3/L)	162	138	241	566	34	42
Amônia Livre Inicial (mg N-NH_3/L)	133	104	74	273	1053	1829

Tabela 3 – Eficiência do stripping da amônia livre do lixiviado obtidos nas cinco bateladas

Parâmetros	Bateladas					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**
N-amoniacal removido (mg N-NH_3/L)	311	232	207	359	1103	1536
Eficiência do Stripping (%)	66	63	46	39	97	97
Alacalinidade Consumida (mg $CaCO_3$/L)	1143	955	931	1434	3525	5441
N-amoniacal removido estimado (mg N-NH_3/L)	315	263	256	395	971	1499
Espaço ocupado por ar (%)	33	33	24	44	44	44
N.A removido por dia (mg N-NH_3/L.dia)	44	17	9	28	79	140
N.A removido por área supercial (mg N-NH_3/L.cm²)	4,89	3,65	1,45	0,53	1,62	2,26

A batelada B3, como citado nos materiais e métodos, teve a forma do reator modificada, com aumento do volume de lixiviado e da camada de ar entre a superfície do efluente e a tampa do recipiente, o *head space*.

Os resultados do stripping da Batelada 03 não foram muito satisfatórios, haja vista que a eficiência foi abaixo daquela observada nas duas bateladas anteriores. A explicação para a baixa eficiência pode estar na alteração do volume e forma do reator e, principalmente, devido a pequena área de contato entre o lixiviado e *head space* do reator.

O stripping da amônia livre realizado em B4 apresentou uma eficiência muito baixa e aquém daquela imaginada após a alteração no formato do reator. A eficiência de 39 % (Tabela 3) foi abaixo até mesmo da eficiência da batelada B3.

Após esses resultados, chegou-se a conclusão que o divisor de vazão de ar utilizado não funcionou corretamente e, portanto, apenas um lado do reator foi aerado, o que explica a baixa eficiência do tratamento. Já em relação a B5, onde foram utilizados dois aeradores, a eficiência foi bastante elevada chegando ao valor de 97% (Tabela 3). Analisando-se o valor de nitrogênio amoniacal removido no reator e aquele obtido teoricamente pelo consumo de alcalinidade, pode-se dizer que estes são bastante próximos, confirmando assim a eficiência do stripping.

Outro aspecto importante a ser observado, é que a eficiência de B5 não se deve apenas a adição de mais um aerador, mas também devido ao aumento do pH, proporcionando uma maior quantidade de nitrogênio amoniacal na forma de gás amônia e, portanto, favorecendo o stripping.

Os resultados da batelada B6 estão apresentados na Tabela 4, nesta foram monitorados os parâmetros ao longo do tempo. Nas Figuras 2a e 2b é mostrada a evolução do pH e das concentrações de alcalinidade e de N-amoniacal ao longo do tempo e a correlação entre N-amoniacal removido e a alcalinidade consumida.

Tabela 4 – Resultados do stripping da amônia livre na batelada B6

Parâmetros	Dias				
	0	**2**	**4**	**6**	**11**
pH	10,42	9,60	9,46	9,40	9,44
Alcalinidade (mg $CaCO_3$/L)	8900	5283	4134	3879	3459
N-amoniacal (mg N-NH_3/L)	1578	608	273	141	42
N. Amoniacal removido (mg N-NH_3/L)	-	969	1304	1437	1536
Eficiência do Stripping (%)	-	61	83	91	97
Alacalinidade Consumida (mg $CaCO_3$/L)	-	3616	4766	5030	5441
N. Amoniacal removido teórico (mg N-NH_3/L)	-	996	1313	1386	1499

A batelada B6 teve por objetivo mostrar o decaimento do nitrogênio amoniacal e da alcalinidade ao longo do tempo, no stripping em tanque de arraste com o sistema fechado. Através da Tabela 4 observa-se que houve a remoção de nitrogênio amoniacal ao longo do tempo, e após 11 dias, a eficiência atingida já era de aproximadamente 97%.

Como visto na Equação 03, a remoção de nitrogênio amoniacal implica no consumo de alcalinidade, valores próximos a 3,63 mg de alcalinidade para cada mg $N\text{-}NH_4^+$ que se dissocia. A partir da alcalinidade consumida, considerando a relação 3,63 mg de alcalinidade/ mg de N removido, estimou-se a remoção teórica de nitrogênio pelo stripping, fixando os valores de alcalinidade. O valor de N removido estimado a partir da alcalinidade foi muito próximo ao verificado no sistema. Na Figura 2b é mostrado o comportamento linear do consumo de alcalinidade em relação à remoção de nitrogênio amoniacal por stripping, observa-se que o coeficiente angular da reta (3,627), que representa a relação entre consumo de alcalinidade/nitrogênio removido, é praticamente igual a relação estequiométrica, que é de 3,63 mg de alcalinidade/mg de N removido.

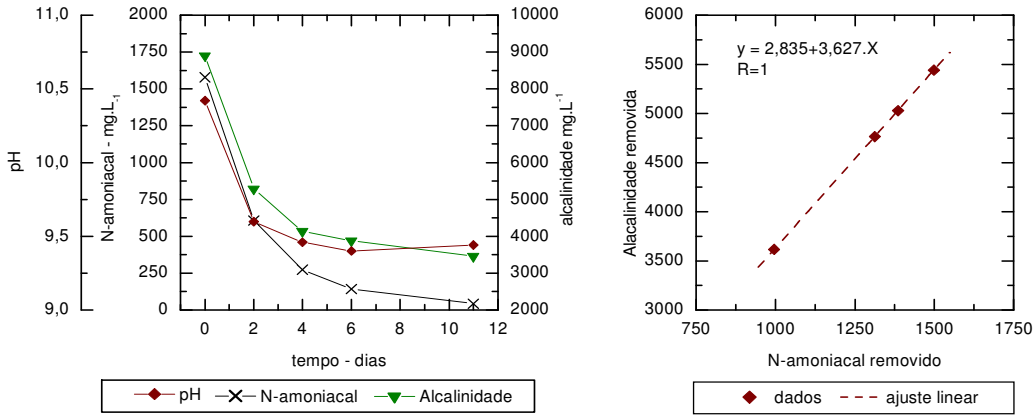


Figura 2 – (a) Evolução do pH e das concentrações de alcalinidade (mg $CaCO_3.L^{-1}$) e de N-amoniacal (mg $N\text{-}NH_4^+.L^{-1}$) ao longo do tempo; (b) correlação entre N-amoniacal removido e alcalinidade consumida.

Na Figura 2a nota-se que entre o início de operação do sistema e o segundo dia, a taxa de remoção de nitrogênio amoniacal é elevada e após esse ponto outra tendência é verificada. Esse fato pode ser devido a eficiência de remoção da amônia no stripping ser proporcional as concentrações de amônia livre.

Após a realização de todas as bateladas pode-se verificar que alguns fatores influenciam diretamente na eficiência do stripping. Na introdução, foi visto que com o aumento do pH e da temperatura, conseqüentemente, a concentração de amônia livre também aumenta, ainda de acordo com o mesmo ponto, a maior concentração de amônia livre no lixiviado aumenta a eficiência do stripping, fato que pode ser verificado na Tabela 3. As bateladas B5 e B6 foram as que apresentaram maior pH inicial, e por seguinte maior quantidade de amônia livre inicial e, portanto as maiores eficiências alcançadas, com valores próximos a 97%. Essa eficiência também pode ser comprovada pela razão de N-amoniacal removido por área superficial (Tabela 3), uma vez que para ambas as bateladas foi utilizado o mesmo reator.

Outra comparação que se pode tecer entre as bateladas é em relação ao tempo de detenção hidráulica. Se for levada em consideração apenas a eficiência do stripping, ou seja, sem nenhum fator externo como tratamentos subseqüentes, pode-se concluir que a eficiência máxima de cada batelada foi conseguida em TDH não muito elevado.

Essa comparação pode ser feita entre as bateladas B1, B2 e B6. As bateladas B1 e B2 apresentaram eficiências muito similares, mas se for levado em consideração à relação N-amoniacal removido por TDH, percebe-se que a batelada B1 apresenta uma eficiência superior (Tabela 3).

A mesma conclusão pode-se chegar através dos resultados obtidos em B6, onde já no sexto dia o sistema operava com 91% de eficiência, alcançando 97% no décimo primeiro (Tabela 4). Portanto dependendo da concentração final que se deseja de nitrogênio amoniacal no efluente, o sistema pode ser encerrado antes, isto é em menores TDH, assim favorecendo o uso de reatores menores.

Outra relação importante que influencia no processo de stripping é a área específica, ou seja, a razão entre a área superficial e o volume de lixiviado. Essa relação é uma variável que fornece a transferência de massa no stripping, portanto quanto maior esse valor, maior a eficiência do mesmo. A relação entre área superficial e eficiência do tratamento também é citada por Silva (2002).
De acordo com a Tabela 3, as bateladas que tiveram maior valor para a relação área superficial/volume de lixiviado realmente apresentaram maior eficiência, sendo elas B5 e B6, porém salienta-se também a influência do pH mais elevado nestas bateladas. Provavelmente, a relação área superficial/volume de lixiviado foi um dos fatores responsável pela baixa eficiência da batelada B3, pois essa apresentava o menor valor para esse índice. Não é possível realizar comparações mais aprofundadas, pois como visto várias modificações no lixiviado foram realizadas de uma batelada para outra, alterando outros fatores como já comentado.

Hossaka (2008) realizou em seu trabalho o stripping em escalda de bancada, mesmo o autor não fornecendo as dimensões do seu reator, os resultados por ele apresentados foram comparados com as bateladas B1 e B2, que foram realizadas sem correção do pH. Observou-se que no presente estudo a eficiência de remoção de nitrogênio foi menor. Uma possível explicação para a diferença nos resultados pode estar relacionada à área superficial do "tanque" usada por Hossaka (2008), provavelmente maior que a desta pesquisa.

No caso das bateladas B5 e B6, a eficiência foi superior à obtida por Hossaka (2008), entretanto nestas o pH foi corrigido para 9,6 e 10,4, respectivamente.

Campos et al. (2007, apud SOUTO, 2009) obtiveram eficiência de 96 % na remoção de nitrogênio amoniacal em recipiente com 2L de lixiviado, aerado por compressor de aquário e sem correção do pH, entretanto com temperatura elevada, atingindo 65^{o}C. Cheung et. al. (1997, apud FERRAZ, 2010) obteve eficiência similar (93%) realizando stripping usando 3 L de lixiviado, com pH corrigido para 12 e taxa de aeração de 300 L/h. Se comparado esses resultados com a batelada B6, cujo pH foi próximo ao citado, demorou-se 6 dias para chegar ao um resultado parecido.

Após essas comparações pode-se concluir que os tanques de arraste em sistema fechado podem fornecer eficiência próxima aos sistemas abertos, entretanto observou-se que para isso o TDH foi mais elevado.
Com o objetivo de comparar a eficiência do tanque de arraste dessa pesquisa com uma torre de arraste, verificou-se que Ferraz (2010), utilizando uma torre de arraste, pH elevado para 10,35, TDH de 12 dias, com uma taxa de aeração de 1600 L ar/h, ou seja, uma vazão de ar 9 vezes maior que a utilizada neste trabalho, obteve 99% de eficiência na remoção da amônia livre. A batelada B6 cujo pH e TDH foram próximos ao citado apresentou eficiência bastante semelhante, a mudança significativa foi no volume de lixiviado tratado, na pesquisa atual 5L e na citada 12 L. Portanto considerando apenas a eficiência do stripping, pode-se dizer que são bastante semelhantes.

Quanto a variação do pH observado em todas as bateladas, a explicação está no deslocamento do equilíbrio observado na Equação 01, ocasionado pela volatilização do gás amônia. Tal fenômeno favorece a produção de íons H^+, o qual consome a alcalinidade do meio e, portanto, favorecendo a redução do pH da solução. Esse fato não gera uma acidez imediata na solução, devido ao tamponamento pela alcalinidade presente no sistema carbonato, apresentado nas Equações 04, 05, 06 e 07.

Em alguns casos o pH do meio pode se manter constante durante a volatilização da amônia livre ou ainda apresentar um aumento no fim da operação. O primeiro fato ocorre quando a alcalinidade do meio é muito elevada, assim mesmo que haja consumo desta pelo íon hidrogênio, a alcalinidade residual ainda é elevada, portanto não havendo alteração no pH do efluente final (HOSSAKA, 2008).

O aumento do pH observados nas bateladas B1, B2, B3 e B4, o qual foi diferente do esperado, se dá possivelmente pela volatilização do gás carbônico (CO_2), juntamente com o NH_3. De acordo com Equação 04, caso isso ocorra, o deslocamento químico será para a esquerda, ou seja, favorecendo assim o consumo de íons H^+ e, portanto aumentando o pH do meio.

$$\mathbf{CO_{2(aq)} + H_2O \leftrightarrow 2H^+ + CO_3^-} \qquad \text{equação (4)}$$

$$\mathbf{CO_{2(aq)} + H_2O \leftrightarrow H_2CO_3} \qquad \text{equação (5)}$$

$$\mathbf{H_2CO_3 \leftrightarrow H^+ + HCO_3^-} \qquad \text{equação (6)}$$

$HCO_3^- \leftrightarrow H^+ + CO_3^{-2}$ equação (7)

A volatilização do gás carbônico tende a deslocar as Equações 05 a 07 para a esquerda, uma vez que o equilíbrio do CO_2 no gás/liquido , no caso o sistema é parcialmente fechado, pois o gás era coletado em uma solução ácida, tende a ser restabelecido, com isso a Equação 05 desloca-se para a esquerda e conseqüente o mesmo acontece com a Equação 06, onde pode-se observar o consumo de H^+.

O aumento do pH pode ser observado na Tabela 3. Já as bateladas B5 e B6, as quais tiveram seu lixiviado pré-tratado com adição de hidróxido de sódio para aumento do pH, apresentaram redução do pH até valor próximo a 9,5, que está relacionado a alcalinidade a carbonato.

CONCLUSÃO

Avaliando a eficiência do stripping chega-se as conclusão que o stripping realizado em regime fechado apresentou eficiência similar aos realizados em regime aberto, entretanto necessitou de TDH maior.

O aumento do pH melhorou eficiência na remoção do nitrogênio do lixiviado por stripping da amônia livre em tanques de arraste, como era esperado. Em lixiviado com pH 10,4 observou-se a remoção de 97% do nitrogênio amoniacal em 11 dias.

A relação entre a remoção do nitrogênio amoniacal pelo stripping do gás amônia e da alcalinidade foram lineares e compativeis com a relação estequiométrica;

A área de contato entre o lixiviado, que se pretende tratar, e o ar é fator importante para a eficiência do stripping;

Por fim, pode-se concluir que a realização do stripping da amônia livre presente em lixivado de aterro sanitário, pode ser realizada em sistemas fechados com eficiência bastante próxima às observadas em sistemas aberto, portanto, é viável os estudos para a recuperação do gás amônia liberado no processo.

RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se futuros estudos em relação a recuperação do gás amônia liberado pelo stripping, uma vez que o mesmo é tóxico e pode causar a poluição do ar. Estudos recentes obtiveram êxito nesse aspecto usando torres de arraste (FERRAZ, 2010), entretanto as torres apresentam operação mais trabalhosa e onerosa que os tanques, portanto sendo interessante que se estenda o estudo para os tanques, pois esses operados em sistemas fechados obtiveram resultados próximo aos realizados em sistema aberto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 1004: Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, nov. 2004.
2. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, abr. 1992.
3. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, abr. 1992.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 8849: Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, abr. 1985.
5. APHA/AWWA/WPCF Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater. APHA, 21ª Ed., Washington DC. 2005.

6. CATALDO, D.A.; HAROON, M.; SCHRADER, L.E.; YOUNGS, V.L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic. ***Commun. Soil Science and Plant Analysis***, v.06, n.01, p.71-80, 1975.\

7. CONAMA – CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBINTE. Dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem com estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Resolução CONAMA no 357, 17 de março de 2005. **D.O.U**, Brasília, 18 mar. 2005.

8. DANIEL, Leonida Maria de Castro. ***Remoção de nitrogênio via nitrito em reator operado em batelada seqüêncial contento biomassa imobilizada e aeração intermitente***.2005. 106f. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento). Universidade de São Paulo. São Carlos/SP.

9. FERRAZ, Fernanda de Matos. ***Recuperação da amônia liberada no processo de "air stripping" aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários.*** 2010. 128f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos.

10. FERNANDES, Fernando (Coord.). **Manual Prático para compostagem de biossólidos.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

11. FLECK, Eduardo. ***Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário***. 2003. 213 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

12. GOMES, Luciana Paulo (Coord.). **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras**. Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 2009.

13. GUO, Xuejun; TAK, Jin Kwon; JOHSON, Richard. Ammonia removal from air stream and biogas by H2SO4 impregnated adsorbent originating from waste wood-shaving and biosolid. **Journal of Hazardous Materials**,n.166, p.372-376, 2009.

14. HAMADA, J. **Estimativa de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários.** Rio de Janeiro. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. 19, 1999, Rio de Janeiro. **Anais...** Rio de Janeiro, 1999.

15. HOSSAKA, André Luiz. ***Tratamento biológico de lixiviados de aterro sanitário, utilizando como pré-tratamento a remoção parcial de N-amoniacal por stripping***. 2008. 107 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina/PR.

16. HUANG, Ju-Chang; SHANG, Chii. Air Stripping. In: WANG, Lawrence K.; HUNG, Yung-Tse; SHAMMAS,Nazih K. ***Handbook of Environmental Engineering: Advanced Physicochemical Treatment Processes*.** Humana Press Inc.. Totowa, New Jersey, 2006.

17. IACONI, C.; PAGANO, M.; RAMADORI, R., LOPEZ, A. Nitrogen recovery from a stabilized municipal landfill leachate. **Bioresource Technology**, n.101, p. 1732–1736, 2010.

18. IAMAMOTO, Cristina Yuriko. ***Remoção de nitrogênio de águas residuárias com elevada concentração de nitrogênio amoniacal em reator contendo biomassa em suspensão em bateladas sequüênciais e sob ação intermitente***.2006.Tese (Doutorado em Engenharia) Universidade de São Paulo. São Carlos/SP.

19. IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSITCA**. Pesquisa nacional de saneamento básico**. Apresentada em 2000. Disponível em: <www.ibge.gov.br> Acessado: 17 jun. 2010.

20. JARDIM, Fábio. Destino Final – **Problema ou solução?** Gestão de Resíduos, v. 1, n. 1, p 14-20, 2006.

21. JARDIM, Nilza Silva et al. **Manual de Gerenciamento integrado. Lixo Muncipal**. Instituto de Pesquisa Tecnológicas. CEMPRE, 1995. p.278.

22. KJELDSEN, Peter; BARLAZ, Morton, A.;ROOKER, Alix P.; BAUN, Anders; LEDIN, Anna; CHRISTENSEN, Thomas H. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 32 (4): p.297-336, 2002.

23. MACEDO, Horácio. **Elementos da teoria cinética dos gases**. 1 ed. Rio de Janeiro: Editora Guanabara Dois, 1978.

24. MARINGONDA Jr., Audinil. ***Remoção de nitrogênio de lixiviado de aterros de resíduos sólidos urbanos empregando sistema de lodos ativados, composto por reator anóxico e aeróbio em série.*** 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento). Universidade Estadual de Londrina. Londrina/PR.

25. METCALF & EDDY. **Wastewater engineering: Treatment Disposal Reuse.**Revisão deGeorge Tchobanoglous e Franklin Burton. 3. Ed. New York: McGraw-Hill, 1991.

26. Ministério do Trabalho e Emprego (1978). Secretaria de Inspeção do Trabalho. Portaria n.º 3.214, 08 de junho de 1978.

27. MORAIS, Josmaria Lopes de. ***Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitário***. 2005. 207 f. Tese (Doutorado em Química) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba/PR.

28. MOREIRA, Fátima Maria de Souza; SIQUEIRA, José Oswaldo. Fixação biológica de nitrogênio atmosférico. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: Editora UFLA, 2006, p. 449-476.

29. MOTA & VON SPERLING (Coord.);. **Nutrientes de esgoto sanitário: utilização e remoção**.Projeto PROSAB, Rio de Janeiro: ABES, 2009.

30. QUAN, X.; YE, C.; XIONG, Y.; XIANG, J.; WANG, F. Simultaneous removal of ammonia, P and COD from anaerobically digested piggery wastewater using an integrated process of chemical precipitation and air stripping. **Journal of Hazardous Materials** ,2010.

31. QUEIROZ, Luciano Matos. ***Estudo da remoção biológica de nitrogênio via nitrito utilizando fenol como fonte de carbono operando um reator em batelada sequencial em escala pilto***. 2006. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Paulo/SP.

32. RODRIGUES, C. V. L.; ALVIN, C. A. N.; FERNANDES, F.; LOPES, D. D. **Remoção de N-amoniacal de lixiviado de aterro sanitário por stripping da amônia livre.** In Anais do XVIII EAIC, Londrina, 2009.

33. SILVA, Alessandra Cristina. ***Tratamento do percolado de aterro sanitário e avaliação da toxicidade do efluente bruto e tratado.*** 2002.111 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro/RJ.

34. SONG, Y; YUAN, P.; ZHENG, B.; PENG, J.; YUAN, F.; GAO, Y. Nutrients removal and recovery by crystallization of magnesium ammonium phosphate from synthetic swine wastewater. **Science Direct**, n.69, p.319-324, 2007.

35. SOUTO, Gabriel D'Arrigo de Brito.***Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ("stripping").***2009. 360f. Tese (Doutorado em Engenharia). Universidade de São Paulo. São Carlos/SP.

36. TRENNEPOHL, F. G. **Remoção biológica de nitrogênio em lixiviado de aterro de resíduos, em sistema piloto de lodos ativados com fonte externa de carbono.** 2009. 129p. Disertação (Mestrado em Eng. de Saneamento e Edificações) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina.

37. USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Wastewater Technology Fact Sheet Ammonia Stripping**. U.S. Enviroment Protection Agency – Technology Trasnfer, 2000.

38. VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG; 1996.

39. VON SPERLING, M. **Lodos ativados**. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; UFMG; 1996.

40. ZEVZIKOVAS, Rodrigo. Chorume, cada vez menos temido. **Gestão de Resíduos**. n.15 p.18-23.2008.