

II-201 - PRÉ-TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO UTILIZANDO O PROCESSO DE *AIR STRIPPING*: AVALIAÇÃO DOS PARÂMETROS OPERACIONAIS

Míriam Cristina Santos Amaral⁽¹⁾

Engenheira Química pela UFMG. Mestre e doutora em Meio Ambiente pelo Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Professora adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Liséte Celina Lange

Química pela Universidade Federal do Paraná. Mestre e doutora em Tecnologia Ambiental pela University of London - Inglaterra. Professora associada do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Minas Gerais.

Wagner Guadagnin Moravia

Engenheiro Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais. Mestre e Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFMG.

Natalie Cristine Magalhães

Engenheira Química pela UFMG. Aluna de Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA) da UFMG.

Túlio Luís dos Santos

Aluno de graduação em Química no Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais - CEFET-MG. Aluno de iniciação científica no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA na UFMG.

Endereço⁽¹⁾: Av. Antônio Carlos, 6627, Escola de Engenharia, Bloco 2, sala 4544 - Pampulha - Belo Horizonte - MG - CEP: 31270-901 - Brasil - Tel: +55 (31) 3409-1714 - e-mail: miriam@desa.ufmg.br

RESUMO

O lixiviado de aterro sanitário, também denominado chorume, é um problema ambiental devido ao seu potencial de contaminação dos recursos hídricos, apresentando elevada carga orgânica, poluentes tóxicos como metais pesados, e microrganismos patogênicos, sendo que a sua destinação inadequada traz problemas de ordem sanitária, econômica e estética, o que torna necessário tratá-lo antes do lançamento nos cursos d'água. O processo de tratamento de lixiviado de aterro sanitário é reconhecidamente complexo, oneroso e em geral envolve diferentes tecnologias e várias etapas até que se obtenha o efluente final na qualidade exigida pelas normas legais. O nitrogênio amoniacal encontra-se presente no lixiviado de aterro tanto na forma iônica, NH_4^+ , quanto na forma de amônia livre (gasosa), NH_3 , cuja característica resulta em maior toxicidade que a primeira. A eficiência de sistemas de tratamento biológico é afetada pelas elevadas concentrações de amônia livre, devido ao efeito inibidor da atividade microbiana por essa substância. Neste contexto, o método de *air stripping* (arraste por borbulhamento de ar) tem sido largamente utilizado para promover a remoção da amônia contida nestes efluentes e viabilizar o condicionamento do lixiviado às condições mais favoráveis à biodegradabilidade para posterior tratamento biológico. Dessa forma, a presente pesquisa visa estudar, em escala de bancada, a remoção da amônia através do processo de *air stripping* em tanque. Os resultados obtidos durante o processo de *air stripping* se apresentaram extremamente promissores em termos operacionais do sistema e de remoção de amônia. Ao analisar a otimização dos parâmetros operacionais vazão de aeração, pH e temperatura, os resultados mostraram que ao se utilizar uma vazão máxima de ar em torno de 1,2 LPM, com pH do meio entre 10 e 10,5 e uma temperatura elevada em torno de 55°C, obteve-se, para um tempo de operação de 9 horas, uma eficiência de remoção de N-NH_3 acima de 70%, cujo valor é considerado ideal devido à necessidade da existência de nutrientes (nitrogênio amoniacal) para o acontecimento da degradação biológica que ocorrerá na etapa posterior ao processo de *air stripping*.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro Sanitário, Lixiviado, Remoção de Amônia, Air stripping.

INTRODUÇÃO

O lixiviado proveniente de aterro sanitário apresenta alto potencial poluidor devido à presença de alta concentração de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos. Quando descartado sem tratamento prévio, este efluente provoca a contaminação de águas subterrâneas e superficiais.

Estudos afirmam que efeitos adversos podem ser observados no solo, mesmo a grandes distâncias do local de contaminação, bem como alterações na biota aquática (KJELDSEN *et al.*, 2002). Dessa forma, a implementação de sistemas de tratamento para este efluente é uma medida necessária de proteção ambiental, de manutenção da estabilidade do aterro e uma forma de garantir melhores condições sanitárias para a população.

Um dos principais desafios no tratamento de lixiviado é a variabilidade da composição deste efluente, por isso, seu processo de tratamento é complexo, oneroso e envolve vários tipos diferentes de tecnologias com diferentes etapas para se obter um efluente final cujas características se enquadrem na legislação vigente. Uma das principais tecnologias utilizadas para o tratamento de lixiviado é o tratamento biológico através da utilização de biorreatores, devido a sua simplicidade operacional e baixo custo.

Estudos prévios de Calli (2005); Wiszniowski *et al.* (2007) e Contrera (2008) indicaram que a eficiência de sistemas de tratamento biológico é afetada pelas elevadas concentrações de amônia livre, devido ao efeito inibidor da atividade microbiana por essa substância, necessitando assim de um pré-tratamento. Dentre as alternativas de tratamento de efluentes para remoção de amônia, o processo de *air stripping* (arraste por borbulhamento de ar) se destaca como uma boa alternativa para o pré-tratamento do lixiviado para posterior tratamento biológico.

Neste trabalho é proposta a remoção da amônia de lixiviado de aterro sanitário pelo processo de *air stripping* e tem como objetivo avaliar os principais parâmetros operacionais do processo - pH, temperatura e vazão de ar - visando a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal do lixiviado de aterro sanitário previamente a um tratamento biológico, de forma a garantir a concentração máxima permitida de amônia no efluente final, de acordo com a Resolução CONAMA 430/2011.

MATERIAIS E MÉTODOS

AVALIAÇÃO DA REMOÇÃO DE AMÔNIA POR ARRASTE

MONTAGEM DO APARATO EXPERIMENTAL

Para a realização da pesquisa foi implementado um reator de arraste (*air stripping*), de bancada e em regime de batelada, para a determinação dos fatores principais do processo de remoção de amônia e otimização das condições ótimas de operação desta etapa. A seguir, na Figura 1, é ilustrado o esquema do aparato experimental e o reator de bancada utilizado.

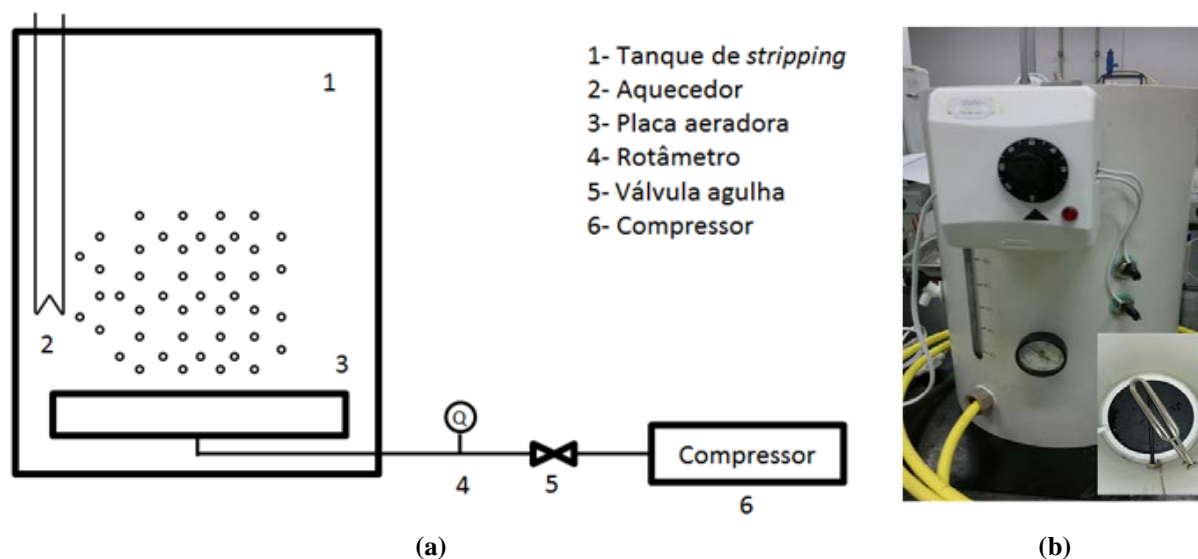


Figura 1: (a) Esquema do reator de arraste; (b) reator de arraste (bancada).

ESTUDO COMPARATIVO DE STRIPPING E AIR STRIPPING

O estudo comparativo entre as diferentes técnicas de remoção por arraste (*stripping* e *air stripping*) foi realizado em bancada, com e sem o ajuste de pH. Amostras de 1L de lixiviado foram submetidas à agitação/aeração por até 48 h em equipamento *Jar Test*, onde alíquotas foram retiradas no decorrer do ensaio e avaliadas quanto à remoção de nitrogênio amoniacal. A velocidade de agitação utilizada foi de 220 rpm e a aeração máxima (aerador de aquário). Os ensaios com ajuste de pH tiveram valores ajustados para 11,5.

AValiação DAS CONdições OPERACIONAIS DO PROCESSO

A avaliação das condições operacionais do processo de remoção de amônia foi realizada através da ferramenta estatística Delineamentos Experimentais. Esta técnica consiste em projetar um bloco de experimentos de forma que seja capaz de fornecer exatamente um determinado tipo de informação específica. Na aplicação desta técnica deve-se desenvolver um estudo de otimização para os diferentes fatores (variáveis) que interferem no processo, com o objetivo de se obter o melhor resultado analítico possível. No tratamento estatístico dos dados foi utilizado o MINITAB® *Release 15 Statistical Software da Minitab Inc.*

Nesta etapa, o reator foi alimentado com 15 L de lixiviado e submetido à aeração por 9 horas, onde alíquotas foram retiradas no decorrer do ensaio e avaliadas quanto à DQO total, pH, alcalinidade e nitrogênio amoniacal. As condições operacionais são detalhadas nos itens a seguir.

DETERMINAÇÃO DOS FATORES PRINCIPAIS

Esta etapa consistiu de 8 ensaios empregando a técnica de delineamento fatorial 2^3 como ferramenta de análise. Os fatores condicionantes do processo avaliados foram: pH, temperatura e vazão de aeração. A variável resposta estudada foi eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal. Na Tabela 1 são apresentados os níveis fatoriais mínimo (-1) e máximo (+1) das condições operacionais dos fatores avaliados. As configurações adotadas em cada ensaio estão resumidas na Tabela 2.

Tabela 1: Níveis dos fatores condicionantes do processo para construção do delineamento fatorial 2^3 .

Fatores condicionantes	Níveis dos fatores	
	-	+
pH	8,0*	11,0
Temperatura (°C)	30	60
Vazão de ar (LPM)	0,6	1,2

* pH ambiente do lixiviado.

Tabela 2: Sinais algébricos para construção do delineamento fatorial 2^3 .

Ensaio	pH	Temperatura	Vazão de aeração
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

OTIMIZAÇÃO DOS FATORES PHE VAZÃO DE AERAÇÃO CONSIDERANDO A TEMPERATURA AMBIENTE (30°C)

Esta etapa consistiu de 6 ensaios empregando a técnica de delineamento composto central rotacional 2^3 como ferramenta de análise. Dados da etapa anterior serão aproveitados na complementação deste estudo. Os fatores condicionantes do processo nessa etapa foram: pH e vazão de aeração. A variável resposta estudada foi a eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal. Na Tabela 3 são apresentados os níveis fatoriais mínimo (-1), máximo (+1) e pontos centrais (2 réplicas) das condições operacionais dos fatores avaliados. As configurações adotadas em cada ensaio estão resumidas na Tabela 4.

Tabela 3: Níveis dos fatores condicionantes do processo para construção do delineamento composto central rotacional 2³.

Fatores condicionantes	Níveis dos fatores		
	-1,41421	0	1,41421
pH	7,4	9,5	11,6
Vazão de ar (LPM)	0,4	0,9	1,4

Tabela 4: Sinais algébricos para construção do delineamento composto central rotacional 2³.

Ensaio	pH	Vazão de aeração
9	1,41421	0
10	-1,41421	0
11	0	-1,41421
12	0	1,41421
13	0	0
14	0	0

OTIMIZAÇÃO DOS FATORES TEMPERATURA E VAZÃO DE AERAÇÃO CONSIDERANDO O PH DO LIXIVIADO BRUTO (8,0)

Esta etapa consistiu de 6 ensaios empregando a técnica de delineamento composto central rotacional 2³ como ferramenta de análise. Dados da etapa anterior serão aproveitados na complementação deste estudo. Os fatores condicionantes do processo nessa etapa foram: Temperatura e vazão de aeração. A variável resposta estudada foi eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal. Na Tabela 5 são apresentados os níveis fatoriais mínimo (-1), máximo (+1) e pontos centrais (2 réplicas) das condições operacionais dos fatores avaliados. As configurações adotadas em cada ensaio estão resumidas na Tabela 6.

Tabela 5: Níveis dos fatores condicionantes do processo para construção do delineamento composto central rotacional 2³.

Fatores condicionantes	Níveis dos fatores		
	-1,41421	0	1,41421
Temperatura (°C)	24	45	66
Vazão de ar (LPM)	0,4	0,9	1,4

Tabela 6: Sinais algébricos para construção do delineamento composto central rotacional 2³.

Ensaio	Temperatura	Vazão de aeração
15	1,41421	0
16	-1,41421	0
17	0	-1,41421
18	0	1,41421
19	0	0
20	0	0

RESULTADOS

ESTUDO COMPARATIVO: STRIPPING/AIR STRIPPING

Os resultados do estudo comparativo das diferentes técnicas de remoção de amônia por arraste estão representados na Figura 2. Os ensaios foram realizados em duplicata.

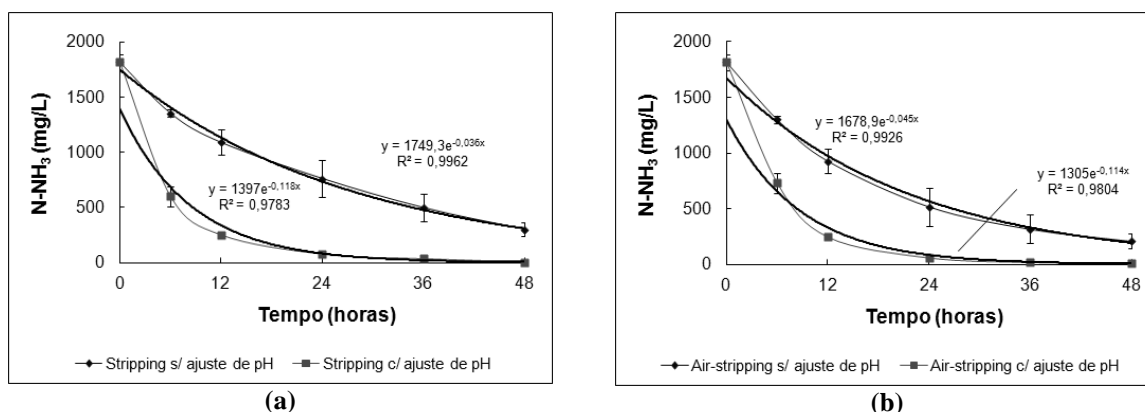


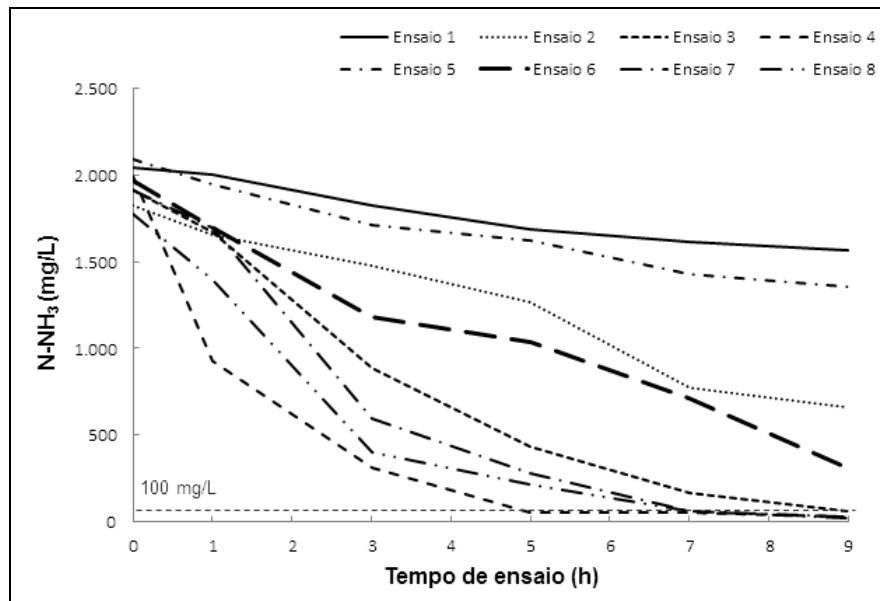
Figura 2: Remoção de amônia por arraste; (a) *Stripping*; (b) *Air stripping*.

Os resultados mostraram uma eficiência de remoção de amônia moderadamente superior para a técnica de *air stripping*. Observa-se eficiências médias máximas de remoção em 24 horas, para lixiviado com concentração inicial de nitrogênio amoniacal de 1.816 mg/L, de 73 e 98% para os ensaios realizados através de *stripping* sem e com o ajuste de pH respectivamente, contra 83 e 99% para os ensaios realizados através de *air stripping*. Notou-se também que o ajuste de pH para a faixa alcalina contribui significativamente no encurtamento do tempo necessário para a remoção de amônia. Com base nesses resultados, a técnica adotada neste projeto para a remoção de amônia foi *air stripping*.

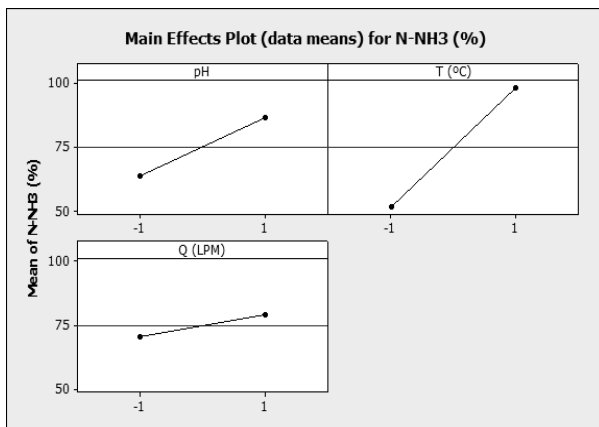
AValiação DAS Condições Operacionais DO Processo DE Air Stripping

DETERMINAÇÃO DOS FATORES PRINCIPAIS

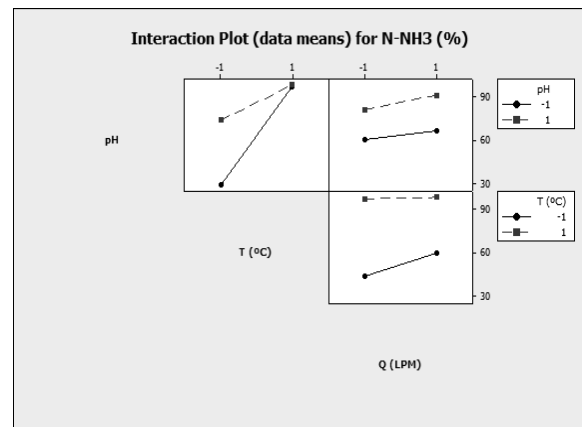
A Figura 3 apresenta a estimativa dos efeitos principais dos fatores envolvidos no processo de remoção de amônia por arraste e suas respectivas interações sobre a resposta eficiência de remoção de N-NH₃, quando ocorre mudança do nível mais baixo (-) para o nível mais alto (+) de cada fator.



(a)



(b)



(c)

Figura 3: (a) Remoção de N-NH₃ obtidos para os ensaios de remoção de amônia por arraste; (b) Efeitos principais e (c) Interações entre efeitos para os fatores operacionais em relação à resposta eficiência de remoção de N-NH₃.

Observa-se pelo gráfico de remoção de amônia (Figura 3 (a)) que para resultados eficientes de remoção de amônia é necessário atuar na correção de pH ou na elevação de temperatura do efluente. Pelos ensaios 5 (pH 8, temperatura 30°C e vazão de ar 1,2 LPM) e 1 (pH 8, temperatura 30°C e vazão de ar 0,6 LPM) observa-se que a contribuição da vazão de aeração é importante como complementação mas insuficientes para uma elevada remoção de amônia quando aplicada de forma isolada.

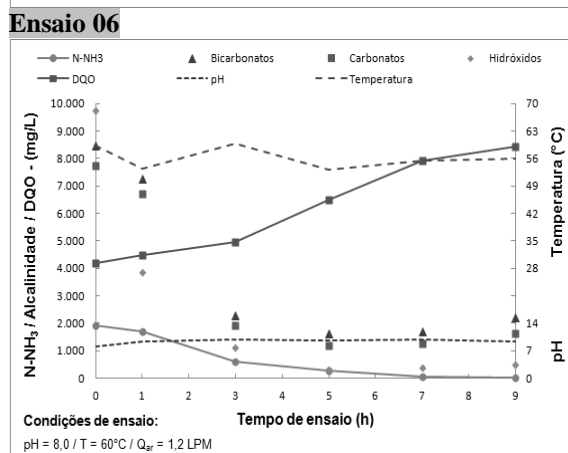
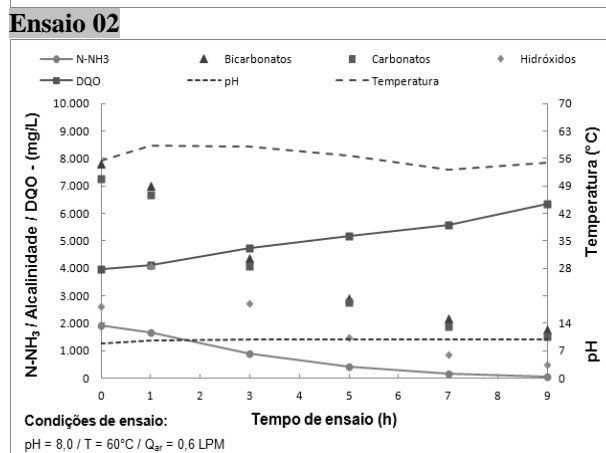
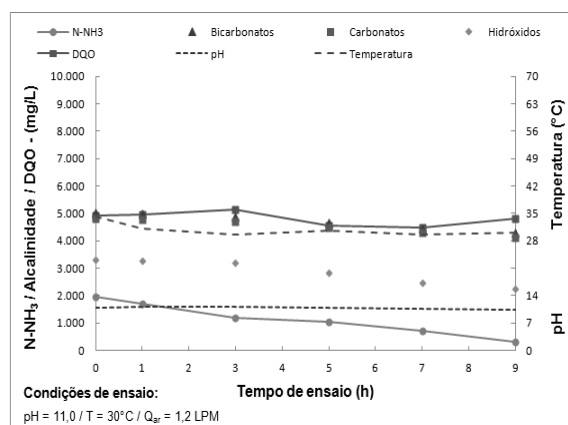
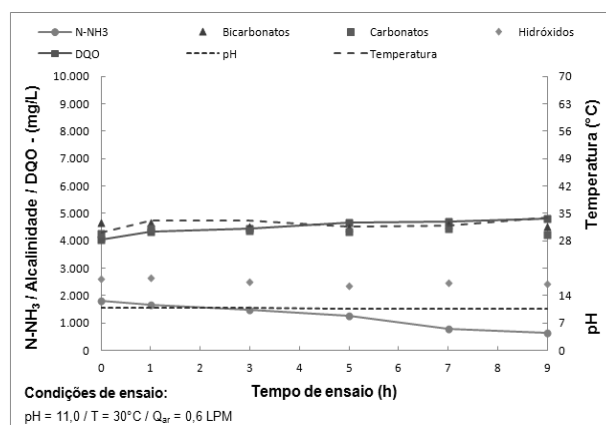
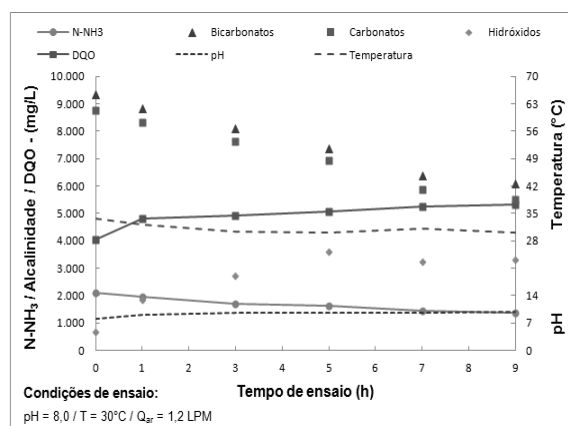
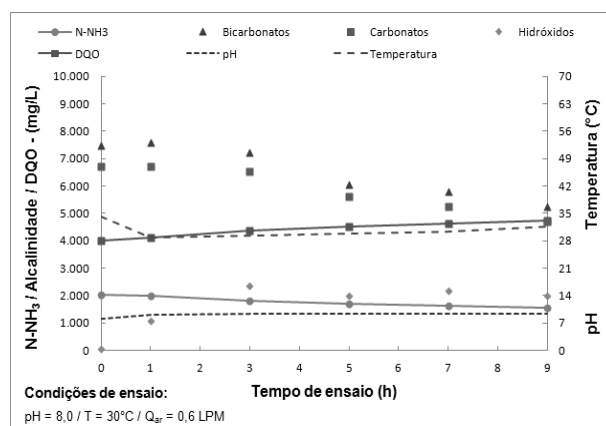
Reforça que o objetivo nesta etapa não é atingir os níveis de concentração de amônia estabelecidos pela legislação vigente, que é de 20 mg/L (Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH nº. 1, de 05 de maio de 2008), e sim a remoção até a concentração necessária para suprir a relação C:N à etapa biológica posterior (~100 mg/L).

De acordo com os gráficos de Efeitos Principais pode-se observar que os fatores com maior potencial de influência sobre a resposta em questão foram, respectivamente, a elevação da temperatura e do pH. A elevação da temperatura de 30 para 60°C praticamente dobrou a eficiência de remoção de amônia (~95%) para o mesmo tempo de detenção hidráulica.

A interação entre os efeitos dos fatores pH e temperatura é observada uma vez que estes fatores estão relacionados com o equilíbrio químico da amônia na forma livre/ionizada. Quando o pH se encontra acima de

11,0, quase que a totalidade da amônia se encontra na forma livre (favorável ao desprendimento para atmosfera), abaixo de 5,0 na forma ionizada (dissolvida na massa líquida). Já a temperatura está associada ao deslocamento do equilíbrio da reação (sentido de formação de NH_3 na forma livre) uma vez que proporciona a diminuição da solubilidade do gás NH_3 no meio líquido. Entretanto, do ponto de vista operacional, é mais atrativo economicamente a atuação em um destes fatores operacionais quando se tem como foco a eficiência do processo de remoção de amônia.

A Figura 4 apresenta os parâmetros de controle de cada ensaio (N-NH_3 , DQO total e alcalinidade).



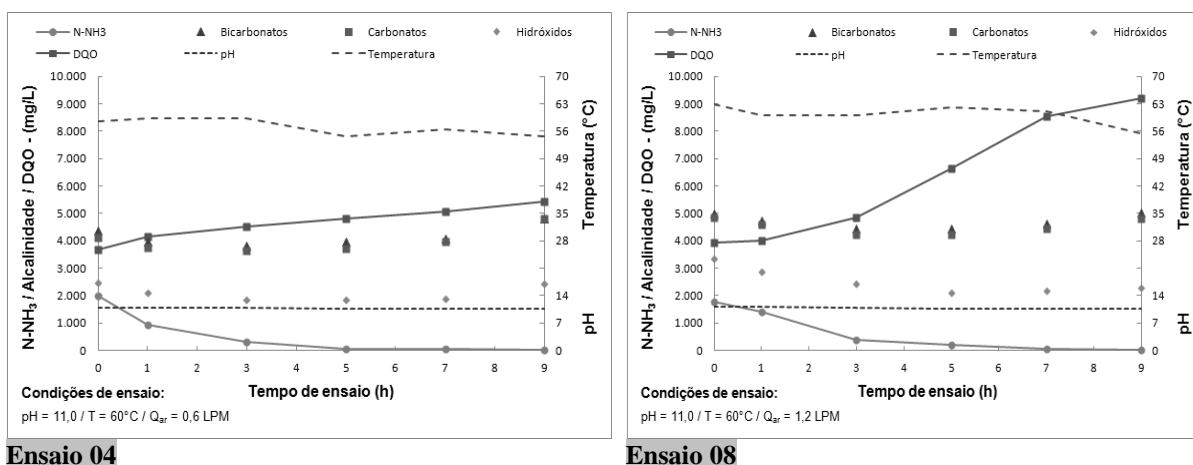


Figura 4: Ensaios para a avaliação do *air stripping*: fase de determinação dos fatores principais do processo.

Vale ressaltar que nos ensaios realizados a 60°C, a concentração de DQO foi elevada em função da evaporação acentuada ocasionada pela alta temperatura de ensaio. No entanto, essa condição de ensaio se refere às condições normais a serem enfrentadas na escala real do tratamento e devem ser levadas em conta para fins de projeto da estação.

OTIMIZAÇÃO DOS FATORES PRINCIPAIS DO PROCESSO

FATORES: PH E VAZÃO DE AERAÇÃO CONSIDERANDO TEMPERATURA AMBIENTE (30°C)

O parâmetro de controle de cada ensaio na fase de otimização dos fatores de processo pH e vazão de aeração foi o N-NH₃.

Os resultados foram avaliados através de um delineamento composto central rotacional 2³. As Figuras 5 (a) e (b) apresentam, respectivamente, as superfícies de resposta e curvas de contorno para a resposta eficiência de remoção de N-NH₃ em função dos fatores: pH e da vazão de aeração.

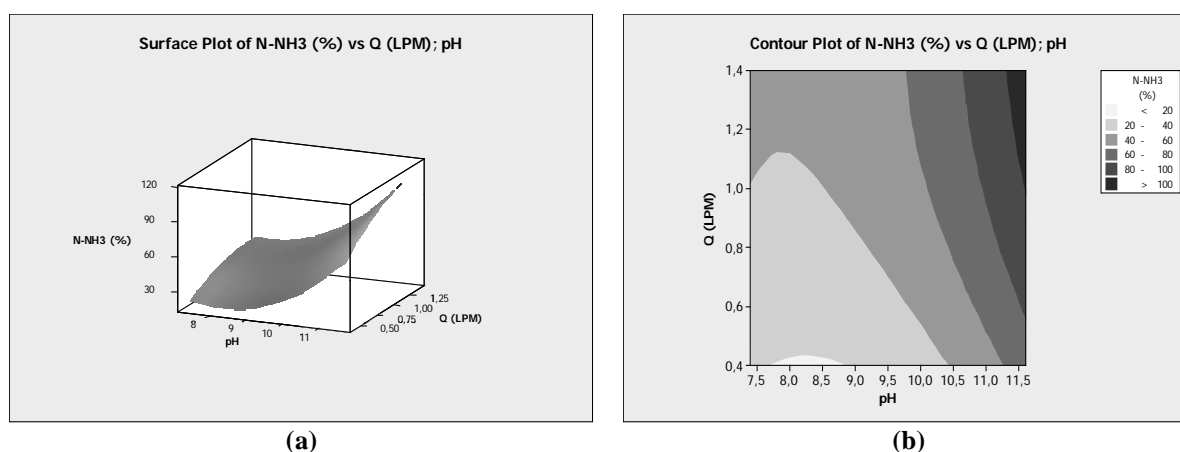


Figura 5: (a) Superfície de resposta e (b) Curvas de contorno para eficiência de remoção de N-NH₃ em função dos fatores: pH e vazão de aeração na fase de otimização dos fatores principais do processo de *air stripping*.

Em relação à vazão de aeração, os resultados mostram que uma maior turbulência no meio condiciona melhor o processo arraste da amônia livre. A vazão máxima de ar testada foi de 1,2 LPM, onde os melhores resultados de remoção de N-NH₃ foram adotados em função do menor custo operacional deste fator em relação ao pH. Nota-se que para esta vazão de ar, a remoção de amônia é máxima quando o pH do meio é próximo a 11,5. No entanto, como a etapa de *air stripping* antecede uma etapa de biológica de tratamento, é necessária uma concentração de nutriente (nitrogênio amoniacal) para o acontecimento da degradação biológica. A Figura 6

apresenta as superfícies de resposta e curvas de contorno para a resposta eficiência de remoção de N-NH_3 acima de 70% em função dos fatores: pH e da vazão de aeração.

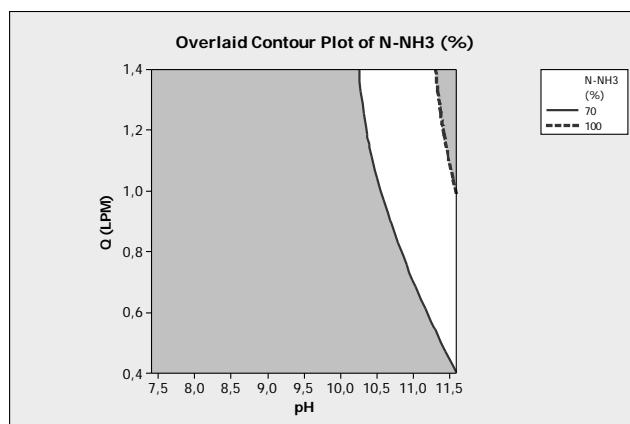


Figura 6: Faixa de variação para eficiência de remoção de N-NH_3 entre 70 a 100% em função dos fatores: pH e vazão de aeração na fase de otimização dos fatores principais do processo de *air stripping*.

Nesse contexto, a faixa de pH sugerido para operação do processo de *air stripping*, considerando a vazão de ar adotada, é entre 10 a 10,5.

FATORES: TEMPERATURA E VAZÃO DE AERAÇÃO CONSIDERANDO O PH DO LIXIVIADO BRUTO (8,0)

O parâmetro de controle de cada ensaio na fase de otimização dos fatores de processo temperatura e vazão de aeração foi o N-NH_3 .

Os resultados foram avaliados através de um delineamento composto central rotacional 2^3 . As Figuras 7 (a) e (b) apresentam as superfícies de resposta e curvas de contorno para a resposta eficiência de remoção de N-NH_3 em função dos fatores: temperatura e da vazão de aeração.

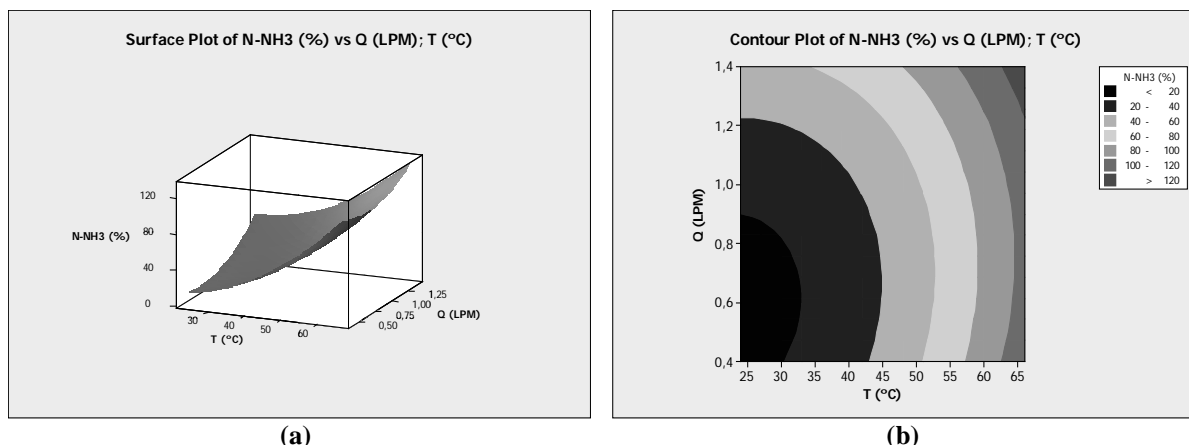


Figura 7: (a) Superfície de resposta e (b) Curvas de contorno para eficiência de remoção de N-NH_3 em função dos fatores: temperatura e vazão de aeração na fase de otimização dos fatores principais do processo de *air stripping*.

Nesta fase, os mesmos efeitos foram observados para a vazão de aeração. Nota-se que para esta vazão de ar, a remoção de amônia é máxima quando a temperatura do meio é próximo à 63°C . No entanto, analogamente, como a etapa de *stripping* antecede uma etapa de biológica de tratamento, é necessária uma concentração de nutriente (nitrogênio amoniacal) para o acontecimento da degradação biológica. Também foi observada a concentração de poluentes em função da evaporação nos ensaios em altas temperaturas, o que pode interferir no desempenho da etapa biológica do tratamento. A Figura 8 apresenta as superfícies de resposta e curvas de

contorno para a resposta eficiência de remoção de N-NH_3 acima de 70% em função dos fatores: temperatura e da vazão de aeração.

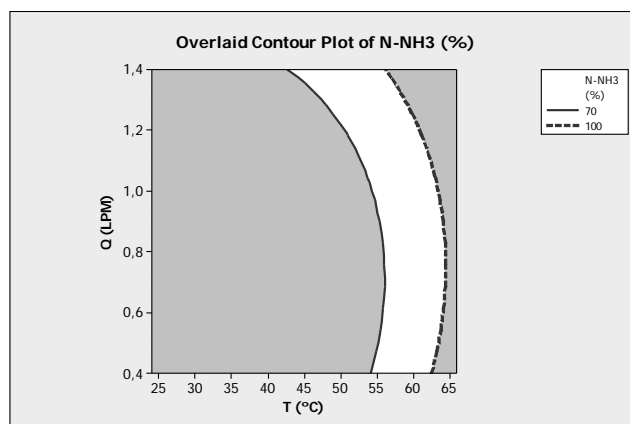


Figura 8: Faixa de variação para eficiência de remoção de entre 70 a 100% em função dos fatores: temperatura e vazão de aeração na fase de otimização dos fatores principais do processo de *air stripping*.

Nesse contexto, a faixa de temperatura sugerido para operação do processo de *air stripping*, considerando a vazão de ar adotada, em torno de 55°C . Ressalta-se que o fator temperatura é alternativo ao fator pH. Deve-se observar que para a manutenção da temperatura de grandes volumes em 55°C , é necessário um projeto hidráulico eficiente. Ressalta-se também de empregar formas de energia alternativas para esse fim.

CONCLUSÕES

O lixiviado se caracteriza pela elevada concentração de matéria orgânica refratária, amônia e compostos tóxicos orgânicos e inorgânicos dentre outros poluentes. Os resultados obtidos durante o processo de *air stripping* se apresentaram extremamente promissores em termos operacionais do sistema e de remoção de amônia. A redução acentuada de amônia contribuirá para uma melhor eficiência do processo biológico que dará sequência ao tratamento do lixiviado, elevando dessa forma o grau de remoção de matéria orgânica.

Ao analisar a otimização dos parâmetros operacionais vazão de aeração, pH e temperatura, os resultados mostraram que ao se utilizar uma vazão máxima de ar em torno de 1,2 LPM, com pH do meio entre 10 e 10,5 e uma temperatura elevada em torno de 55°C , obteve-se, para um tempo de operação de 9 horas, uma eficiência de remoção de N-NH_3 acima de 70%, cujo valor é considerado ideal devido à necessidade da existência de nutrientes (nitrogênio amoniacal) para o acontecimento da degradação biológica que ocorrerá na etapa posterior ao processo de *air stripping*.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Fapemig (Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais), ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro e ao DESA-UFMG pelo incentivo e apoio ao projeto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition. American Public Health Association, Washington, DC, 2005.
2. CALLI, B.; MERTOGLU, B.; INANC, B.; YENIGUM, O. *Effects of high ammonia concentrations on the performances of anaerobic bioreactors*. Process Biochemistry 40p. 1285-1292, 2005.
3. CONTRERA, R.C. *Tratamento de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em batelada sequencial*. Tese (Doutorado- Programa de pós-graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2008.
4. KJELDSEN P.I.; BARLAZ, M.A.; ROOKER, A.P.; BAUN, A.; LEDIN, A.; CHRISTENSEN, T.H. *Present and long-term composition of MSW landfill leachate: a review*. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, v.32, p.297-336, 2002.

5. Legislação Ambiental: Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. *Resolução n° 430, de 13 de maio de 2011*. Acesso em 20/09/2012: <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=646>
6. MORAVIA, W. G. *Avaliação do Tratamento de Lixiviado de Aterro Sanitário Através de Processo Oxidativo Avançado Conjugado com Sistema de Separação por Membranas*. Tese (Doutorado - Programa de pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, 2010.
7. WISZNIOWSKI, J.; SURMACZ-GÓRSKA, J.; ROBERT, D.; WEBER, J.-V. *The effect of landfill leachate composition on organics and nitrogen removal in an activated sludge system with bentonite additive*. Journal of Environmental Management, v.85, p. 59- 68, 2007.