

### **III-077 - DECAIMENTO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS DE UM ATERRO CONTROLADO DE MÉDIO PORTE, APÓS O ENCERRAMENTO**

**Adriano Quadros<sup>(1)</sup>**

Químico formado pela Universidade Estadual de Londrina, mestre em engenharia de edificações e Saneamento pela Universidade Estadual de Londrina

**Jorge Luiz Audibert<sup>(2)</sup>**

Engenheiro civil formado pela Universidade Estadual de Londrina, mestre em engenharia de edificações e Saneamento pela Universidade Estadual de Londrina

**Fernando Fernandes<sup>(3)</sup>**

Engenheiro Civil formado pela Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP  
Mestrado: Controle da poluição - Instituto Nacional Politécnico de Toulouse / 1984.  
Doutorado: Tratamento de Resíduos - Instituto Nacional Politécnico de Toulouse / 1989.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Bento Munhoz da Rocha Neto, 205 Bloco 1B ap. 28 – Santo Amaro – Cambé – Paraná – CEP 86186-000 – Brasil – Tel: +55 (43)9159-7011 e-mail: adrianoquadros@hotmail.com

#### **RESUMO**

O objetivo desse trabalho foi avaliar o decaimento das emissões de biogás no aterro controlado de Londrina e comparar com os resultados obtidos antes do fechamento do mesmo e também comparar com as previsões de três modelos matemáticos. Foram realizadas medidas na camada de superfície através de ensaios de placa estática de fluxo e também nos drenos verticais. As emissões totais de metano foram de  $9.602.192 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  e as totais de biogás foram de  $21.117.824 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ . Em comparação com as últimas medidas antes de fechamento do aterro, houve uma redução de 38% após o período de um ano. Os valores previstos pelos modelos matemáticos foram 55%, 69% e 57% maiores do que o valor medido, para os modelos Triangular, Sholl Canyon e Software Landgem 3.02, respectivamente.

**PALAVRAS-CHAVE:** Biogás, metano, aterro controlado, modelos matemáticos, decaimento das emissões.

#### **INTRODUÇÃO**

Aterros constituem uma forma de destinação final do lixo largamente utilizada nos dias atuais, em virtude de sua simplicidade de execução, seu baixo custo e capacidade de absorção diária de grande quantidade de resíduos, quando comparado às demais formas de tratamento do lixo.

Sua utilização apresenta-se ainda hoje no Brasil e na maioria dos países do mundo, como a principal alternativa utilizada para o lixo. Dentre os problemas ambientais decorrentes dessa prática encontra-se a geração de biogás a partir da decomposição dos resíduos (ENSINAS, 2003).

O aterramento do lixo é apontado juntamente com o tratamento anaeróbio de esgotos domésticos e efluentes industriais, como uma das maiores fontes de metano liberado para a atmosfera, contribuindo assim para o agravamento do efeito estufa. Segundo IPCC (1996) os aterros são responsáveis por cerca de 5 a 20% do total de metano liberado por fontes com origem em atividade humanas.

O biogás é formado a partir da degradação anaeróbia da matéria orgânica. Sua produção é possível a partir de uma grande variedade de resíduos orgânicos como lixo doméstico, resíduos de atividades agrícolas e pecuárias, lodo de esgoto, entre outros. É composto tipicamente por 60% de metano, 35% de dióxido de carbono e 5% de uma mistura de outros gases como hidrogênio, nitrogênio, gás sulfídrico, monóxido de carbono, amônia, oxigênio e aminas voláteis. Dependendo da eficiência do processo, o biogás chega a conter entre 40% e 80% de metano (PECORA, 2006).

A digestão anaeróbia de compostos orgânicos é um processo microbiano de flora mista, onde a matéria orgânica, em ausência de oxigênio molecular, é convertida a gases compostos predominantemente de metano e dióxido de carbono (MASSEY e POHLAND, 1978). Esse processo ocorre em dois estágios, no primeiro estágio atuam bactérias anaeróbias e facultativas, denominadas formadoras de ácidos, onde, segundo

FUENTES et al. (2008), compostos orgânicos complexos do tipo carboidratos, lipídios e proteínas são convertidos em outros compostos mais simples, principalmente, ácidos voláteis. No segundo estágio atuam bactérias estritamente anaeróbias, as quais convertem os ácidos orgânicos em produtos finais gasosos como metano e gás carbônico.

A formação e a taxa de geração dos principais constituintes do gás de aterro é variável ao longo do tempo e segue várias fases distintas que podem ser observadas na Figura 1.

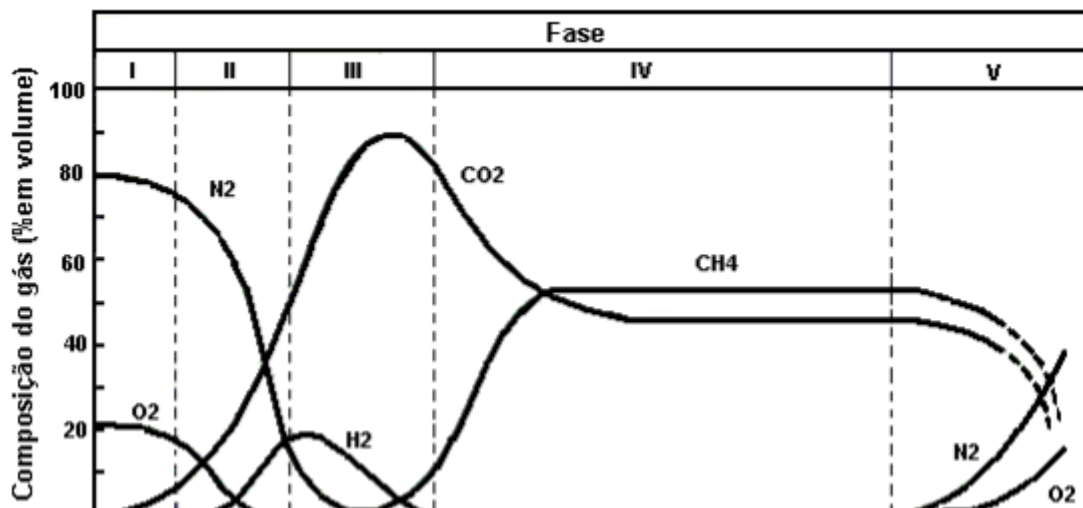


Figura 1 - Fases de formação do biogás de aterro  
Fonte: Adaptado de Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993)

Na fase I a decomposição biológica da matéria orgânica ocorre principalmente em condições aeróbias, na fase II a quantidade de oxigênio é reduzida e as reações anaeróbias começam a se desenvolver, na fase III as reações que começaram a ocorrer na fase II, agora são intensificadas, produzindo quantidades significativas de ácidos orgânicos, na fase IV ocorre a produção simultânea de metano e de ácidos orgânicos, embora a produção de ácidos seja reduzida, na fase V grande parte do material biodegradável já foi consumido e a produção de biogás é reduzida consideravelmente.

Segundo Tchobanoglous, Theisen & Vinil (1993) a duração de cada fase na produção do gás do aterro depende da distribuição da matéria orgânica no aterro, da disponibilidade de nutrientes, do teor de umidade do lixo e do grau de compactação inicial do lixo.

A complexidade dos estudos sobre aterros se origina na diversidade de fatores que exercem influência sobre a produção final dos subprodutos da biodegradação. Em aterros de resíduos sólidos domésticos (RSD), os contextos são alterados continuamente por diversos fatores, vários deles sem possibilidade de controle (AUDIBERT, 2010).

O objetivo desse trabalho foi avaliar decaimento das emissões de biogás no aterro controlado de Londrina e comparar com os resultados obtidos antes do fechamento do mesmo e também comparar com as previsões de três modelos matemáticos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

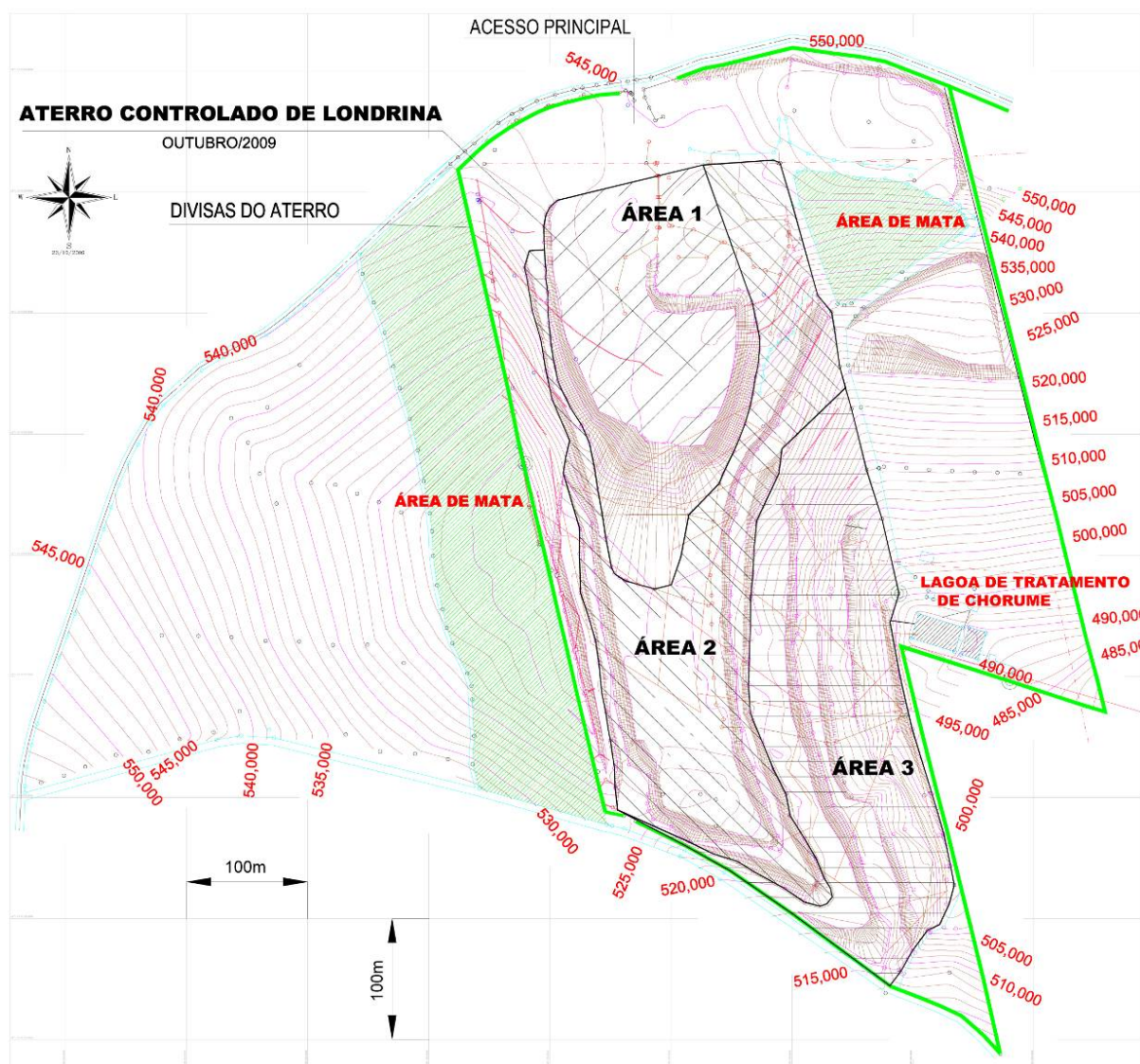
A cidade de Londrina está localizada no norte do estado do Paraná e tem população de aproximadamente 500.000 habitantes. Trata-se de um município relativamente novo com 75 anos de fundação e, atualmente, 97% de sua população residem no núcleo urbano da cidade (IBGE, 2010).

As precipitações no município são mais intensas nos meses de verão e a média anual é de 1606 mm. A temperatura média anual é de 21,1°C (IAPAR, 2010).

O aterro controlado de Londrina iniciou oficialmente suas atividades no ano de 1979 e encerrou suas atividades em setembro de 2010. O aterro localiza-se nas proximidades do aeroporto da cidade.

As empreiteiras que atuaram no aterro de Londrina seguiram como critérios básicos de operação, a facilidade de manobras e a disponibilidade de espaço no terreno, geralmente o lixo era depositado em camadas de aproximadamente 3 metros de altura, compactado por tratores e então recoberto por uma camada de solo do local.

O aterro foi dividido em 3 áreas, de acordo com a idade dos resíduos depositados em cada uma das áreas. A figura 2 mostra essa divisão.



**Figura 2 – Levantamento planoaltimétrico do aterro controlado de Londrina realizado em outubro de 2009.**

A área 1 é a área onde estão depositados os resíduos mais recentes, com cerca de 3 anos, na área 2 estão depositados resíduos com idade entre 3 e 7 anos e, a área 3, com resíduos antigos, com idade superior à 7 anos. As dimensões de cada área são as seguintes: área 1 com 51.535 m<sup>2</sup>, área 2 com 50.506 m<sup>2</sup> e, área 3 com 49.852 m<sup>2</sup>.

Para os ensaios realizados na camada de superfície foi utilizada uma placa estática de fluxo, com dimensões de 0,40m x 0,40m x 0,05m, que resultam num volume interno de 8L (MACIEL, 2003). Para a medição de composição do gás foi utilizado um detector de gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S) modelo X-am 7000 da marca

Draeger. Para as medidas de temperatura foi utilizado um termômetro digital com sensor marca Lutron modelo TM-902 C. A pressão atmosférica necessária para a realização dos cálculos de normalização do volume dos gases foi fornecida pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) – Estação Londrina e ajustada para a altitude do aterro.

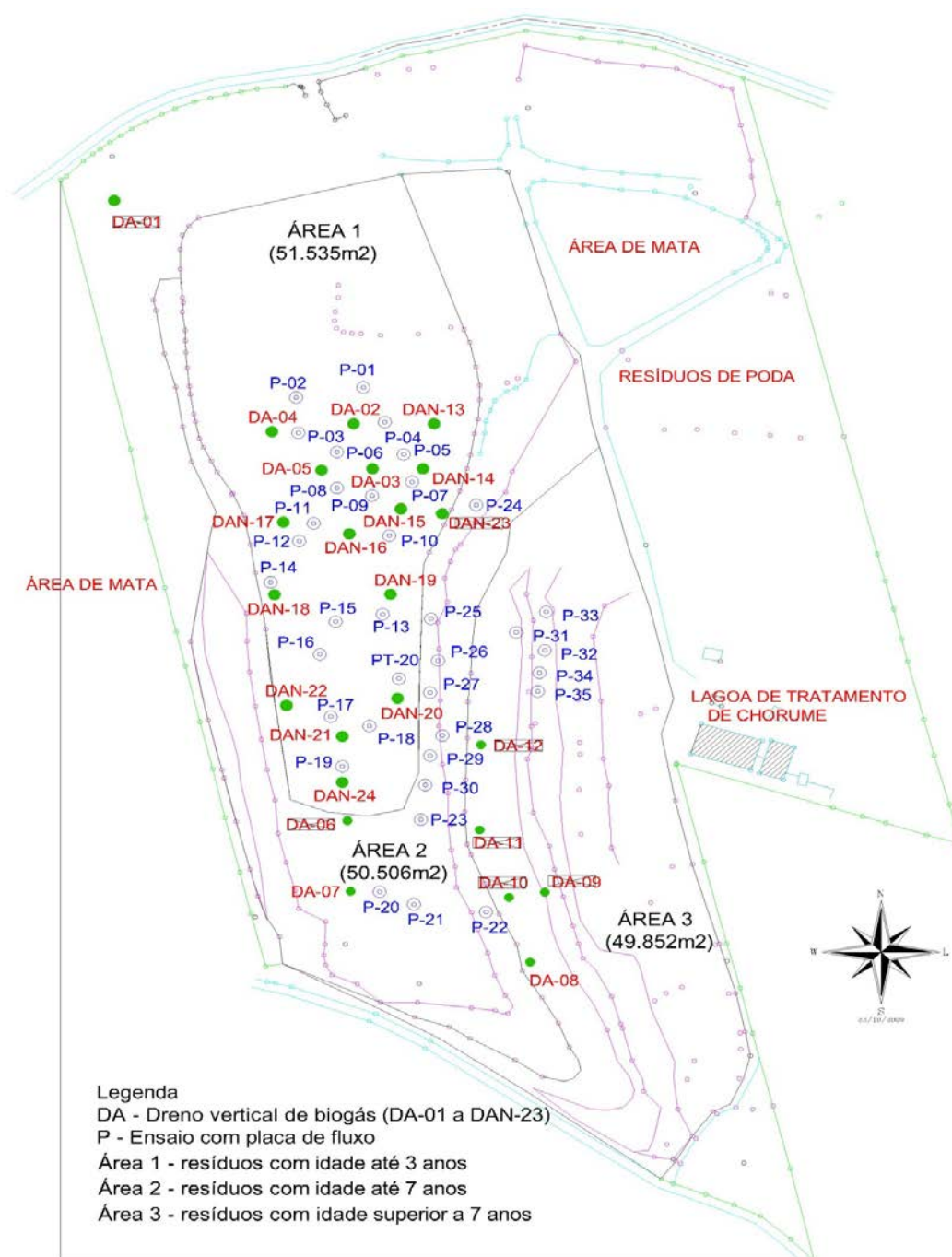
Para os ensaios realizados nos drenos verticais foi utilizado, além do detector de gases, um termo-anemômetro marca Airflow modelo TA35 com faixa de 0 a 20 m.s<sup>-1</sup>, resolução de 0,01 m.s<sup>-1</sup> e termômetro de 0 a 80 °C. As medidas de velocidade do biogás eram feitas em pelo menos três pontos da seção interna dos tubos.

Os dados obtidos em campo foram submetidos a normalização através da equação dos gases ideais.

A quantificação de metano e de gás carbônico foi feita a partir da média estatística dos valores obtidos nos ensaios de placa de fluxo realizados em cada uma das áreas. A soma dos valores de emissão obtidos para cada gás resultou no volume total de biogás.

Foram realizados 35 ensaios de placa e ensaios em todos os 17 drenos ainda presentes no aterro, os drenos 1, 6, 9 a 12 e 23 foram extintos. A localização dos ensaios e dos drenos está representada na figura 3.





**Figura 3 – Levantamento planoaltimétrico simplificado do aterro controlado de Londrina com a localização dos ensaios realizados.**

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Medidas realizadas 1 ano após o encerramento do aterro.

Os resultados das medidas feitas na camada de superfície do aterro de Londrina estão expressos na Tabela 1. É possível constatar a grande variabilidade nos valores obtidos, um dos fatores que podem ter ocasionado essa variabilidade, é a presença de fissuras na camada de cobertura, por onde o biogás escapa para a atmosfera preferencialmente. A quantidade de biogás que vaza pelas fissuras é elevada em alguns pontos, como pode-se constatar, através do odor característico do metano.

Assim como nas fissuras, onde o biogás flui preferencialmente, nas grotas formadas pelas chuvas, houverem pontos onde a camada de solo foi totalmente carregada pelas águas e o lixo ficou descoberto. Ficou evidente, devido ao odor, que o biogás estava fluindo em grande quantidade nesses pontos.

**Tabela 1 – Emissões de metano obtidas através dos ensaios de placa estática de fluxo.**

Ensaio	Emissão de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )
Área 1	
1	10,24
2	21,34
3	157,58
4	46,42
5	18,41
6	21,69
7	51,44
8	49,59
9	52,61
10	31,96
11	122,21
12	57,53
13	39,33
14	15,24
15	24,60
16	11,17
17	176,98
18	8,11
19	25,94
Área 2	
20	15,38
21	14,76
22	197,24
23	203,02
24	206,75
25	105,96
26	371,15
27	27,93
28	16,48
29	24,88
30	84,04
Área 3	
31	8,43
32	6,01
33	11,17
34	0,00
35	6,68

Na tabela 2 estão expressos os resultados obtidos nos drenos verticais, pode-se constatar que a grande maioria dos drenos estão localizados na área 1.

Entre todos os drenos, o único que estava acesso era o Dreno 7, localizado na área 2. Na grande maioria dos drenos é possível constatar um estado de conservação precário, com a maioria dos drenos inclinados. É possível constatar o vazamento de biogás pela base dos drenos, onde não foi possível realizar medidas com os equipamentos disponíveis.

**Tabela 2 – Emissões de metano nos drenos verticais.**

Dreno	Vazão de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )
Área 1	
DA-02	0,11
DA-03	1,68
DA-04	1,06
DA-05	2,38
DAN-13	3,25
DAN-14	4,08
DAN-15	1,33
DAN-16	3,46
DAN-17	1,35
DAN-18	21,74
DAN-19	2,89
DAN-20	1,39
DAN-21	4,97
DAN-22	18,08
DAN-24	0,41
Área 2	
DA-07	19,75
Área 3	
DA-08	6,08

Os resultados de emissões anuais de metano no aterro controlado de Londrina, estão expressos nas Tabelas 3 e 4. A emissões totais foram de 9.602.192Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> cerca de 91% do total, 8.778.664 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, foram provenientes da camada superficial, enquanto que as emissões através dos drenos verticais foi de cerca de 9%, 823.528Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>. A baixa contribuição dos drenos verticais pode ser justificada pelo estado de conservação dos mesmos e também pelo fato do aterro controlado de Londrina não ter sido planejado para captar o biogás através dos drenos, sendo assim, sua eficiência em captar o biogás fica comprometida.

**Tabela 3 – Emissões de metano através da superfície.**

	Emissão de CH <sub>4</sub> na área 1 (Nm <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Emissão anual na Área 1 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão de CH <sub>4</sub> na área 2 (Nm <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Emissão anual na Área 2 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão de CH <sub>4</sub> na área 3 (Nm <sup>3</sup> .m <sup>-2</sup> .ano <sup>-1</sup> )	Emissão anual na Área 3 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão anual na Superfície do Aterro (Nm <sup>3</sup> /ano)
Emissões superficiais Médias (Set/2011)	49,6	2.556.057	115,24	5.820.092	8,07	402.514	8.778.664
Emissões superficiais Médias (Set/2010) (AUDIBERT, 2011)	60,1	3.097.769	198,70	10.035.542	42,51	2.119.209	15.252.520

**Tabela 4 – Emissões de metano através dos drenos verticais.**

	Emissão de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> )	Emissão anual na Área 1 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Emissão anual na Área 2 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> /h)	Emissão anual na Área 3 (Nm <sup>3</sup> /ano)	Emissão anual nos Drenos do Aterro (Nm <sup>3</sup> /ano)
Emissões através dos drenos (set/2011)	68,2	597.257	19,8	173.010	6,1	53.261	823.528
Emissões através dos drenos (set/2010) (AUDIBERT,2011)	118,2	1.035.169	34,1	299.066	16,4	143.664	1.477.900

A mesma metodologia de cálculos foi adotada para o cálculo das emissões de gás carbônico. As emissões de gás carbônico proveniente da superfície foi de 10.776.288 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> e de 739.344 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, resultando num total de 11.515.632Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

O valor total das emissões de biogás foi de 21.117.824 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

#### **Comparação com as medidas realizadas no mês de fechamento do aterro.**

Audibert(2011) em seu trabalho, realizou medidas no aterro controlado de Londrina nos anos de 2009 e 2010, até o encerramento do aterro, e também, comparou os valores medidos com previsões de diversos modelos matemáticos. Sua última campanha de medidas no aterro, foi realizada no mesmo período em que houve o encerramento do mesmo e os resultados obtidos estão expressos em nas Tabelas 3 e 4.

Na campanha realizada pouco antes do fechamento do aterro, Audibert, obteve emissões de biogás de 34.352.446 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>, sendo a parcela correspondente ao metano de 16.905.802 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup> e a parcela correspondente ao gás carbônico de 17.446.644 Nm<sup>3</sup>.ano<sup>-1</sup>.

Realizando um comparativo entre os trabalhos, é possível constatar que houve uma diminuição de cerca de 38% na produção de biogás, em um período de aproximadamente 1 ano.

Essa diminuição pode ser justificada por uma série de fatores, o primeiro e mais importante, é o fato de não haver mais depósito de lixo no aterro, logo a matéria biodegradável disponível é menor e consequentemente a produção de biogás. Outro fator é o fato de que os equipamentos utilizados nesse trabalho não possuem a capacidade de realizar medidas em fissuras e em grotas, que são lugares onde o biogás tem o escape facilitado. Também é necessário destacar que a região passava por uma estiagem durante o período de realização das medidas, portanto, com a menor disponibilidade de água, as reações de biodegradação da matéria orgânica são desfavorecidas.

#### **Comparação das medidas com as estimativas obtidas através de modelos matemáticos.**

Audibert(2011) também estimou a produção de biogás no aterro controlado de Londrina a partir modelos matemáticos e também a produção após o encerramento do aterro. Os modelos matemáticos utilizados foram, o modelo triangular de Tchobanoglous, Theisen & Vigil (1993), o modelo Scholl Canyon (USEPA, 1998) e também o software Landgem 3.02 (USEPA, 2005). A seguir são apresentadas as equações que definem cada um dos modelos.

A equação 1 define o modelo Scholl Canyon.



$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-k \times t} - e^{-k \times t_c}) \text{ (Equação 1)}$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  = quantidade de metano produzida por ano ( $m^3/\text{ano}$ )

$k$  = taxa de geração de metano ( $0,05 \text{ ano}^{-1}$ )

$L_0$  = potencial da geração de metano ( $170 \text{ m}^3 \text{ de } CH_4/\text{ton. resíduo}$ )

$R$  = taxa média anual de resíduos sólidos recebidos durante a vida ativa do aterro ( $\text{ton.}/\text{ano}$ )

$t$  = tempo desde o início do depósito dos RSD (anos)

$c$  = tempo desde o fechamento do aterro (anos);  $c = 0$  para aterros ativos

$e$  = base log, sem unidade.

A equação 2 é a equação utilizada pelo software Landgem 3.02.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0,1}^i k \times L_0 \times \left[ \frac{M_i}{10} \right] \times (e^{-k \times t_{ij}}) \text{ (Equação 2)}$$

Onde:

$Q_{CH_4}$  = quantidade de metano produzida por ano ( $m^3/\text{ano}$ )

$i = 1$  - tempo em anos a ser incrementado

$n$  = ano do inventário

$j = 0,1$  - tempo em anos a ser incrementado

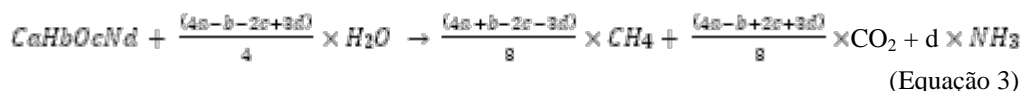
$k$  = taxa de geração de metano ( $0,05 \text{ ano}^{-1}$ )

$L_0$  = potencial da geração de metano ( $170 \text{ m}^3 \text{ de } CH_4/\text{ton. resíduo}$ )

$M_i$  = massa de resíduos sólidos recebidos no ano “i” ( $\text{ton.}/\text{ano}$ )

$t$  = idade da seção “j” dos resíduos  $M_i$  recebidos no ano “i”

As equações 3 e 4 são utilizadas no modelo triangular para se calcular o volume de metano produzido por unidade de massa de resíduo.



$$V_{CH_4} = M_s \times \frac{M_{CH_4}}{(M_{C_aH_bO_cNd} \times \rho_{CH_4})} \text{ (Equação 4)}$$

Onde:

$V_{CH_4}$  = volume unitário de gás metano ( $m^3/\text{kg}$ )

$M_s$  = massa seca de resíduos (RB ou LB) (kg)

$M_{CH_4}$  = massa de gás metano obtido na equação 3 (kg)

$M_{C_aH_bO_cNd}$  = massa da matéria orgânica obtida na equação 3 (kg)

$\rho_{CH_4}$  = massa específica do gás metano ( $0,716 \text{ kg}/m^3$ )

A Tabela 5 mostra as estimativas de emissão de metano para cada um dos modelos em 2011, considerando a desativação do aterro em 2010.

**Tabela 5 – Estimativa de emissões de metano no aterro controlado de Londrina em 2011, segundo diversos modelos.**

Modelo	Estimativa de produção em 2011 ( $Nm^3 \text{ de } CH_4/\text{ano}$ )
Modelo Triangular	14.887.427
Modelo Scholl Canyon	16.273.427
Software Landgem 3.02	15.107.565

Em comparação com o valor medido na campanha realizada,  $9.602.192 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$ , os modelos matemáticos preveem valores 55%, 69% e 57% maiores para os modelos Triangular, Sholl Canyon e Software Landgem 3.02, respectivamente. Essa diferença pode ser justificada pelas fissuras, grotas e também pela estiagem em que se encontrava a região na época de realização das medidas.

O fato de os modelos matemáticos não serem adaptados às condições climáticas brasileiras pode ser determinante para as diferenças constatadas.

## CONCLUSÕES

- 1- O valor total das emissões de biogás foi de  $21.117.824 \text{ Nm}^3 \cdot \text{ano}^{-1}$  no aterro controlado de Londrina para o ano de 2011, 38% menor do que no ano de 2010.
- 2- A queda nas emissões de biogás é decorrente do fechamento do aterro em 2010, pois o aterro deixou de receber resíduos.
- 3- Os modelos matemáticos previram valores 55%, 69% e 57% maiores do que o valor obtido, para os modelos Triangular, Sholl Canyon e Software Landgem 3.02, respectivamente.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AUDIBERT, J. L. Avaliação qualitativa e quantitativa da produção de biogás do aterro controlado de Londrina. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.
2. ENSINAS, A. V., Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas - SP. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas. 2003.
3. FUENTES et al. Application of two anaerobic digestion models to biofilm systems. Biochemical Engineering Journal. v.38 , 2008.
4. INSTITUTO AGRÔNOMO DO PARANÁ – IAPAR (2010). Cartas Climáticas do Paraná. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>
5. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2010). Disponível em [www.ibge.gov.br](http://www.ibge.gov.br). Acesso em novembro de 2011.
6. INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Guia para inventários nacionais de gases de efeito estufa. Módulo 6: Lixo. Volume 2, 1996.
7. MACIEL, F.J. Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/Pe. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2003.
8. MASSEY, M.L.; POHLAND, F.G. Phase separation of anaerobic stabilization by kinetic controls. J. Water pollut. Control. Fed. v. 50, p. 2204-2222 1978.
9. PECORA, V., Implantação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP – Estudo de Caso, Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
10. TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H. & VIGIL, S. Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues. Irwin MacGraw-Hill. 1993. 978p.
11. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA, 1998). AP 42 Section 2.4 – Municipal Solid Waste Landfills, Related Information. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf> Acesso em Novembro/2011.
12. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA, 2005). Landfill Gas Emissions Model (LandGEM) Version 3.02 User's Guide. May 2005. Disponível em: <http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302-guide.pdf> Acesso em Novembro/2011.