



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

JORGE LUIZ AUDIBERT

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS DO ATERRO
CONTROLADO DE LONDRINA**

LONDRINA
2011

JORGE LUIZ AUDIBERT

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS DO ATERRO
CONTROLADO DE LONDRINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção ao título de Mestre.

Orientador: Prof. Dr. Fernando Fernandes

LONDRINA
2011

JORGE LUIZ AUDIBERT

**AVALIAÇÃO QUALITATIVA E QUANTITATIVA DO BIOGÁS DO ATERRO
CONTROLADO DE LONDRINA**

Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção ao título de Mestre.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Fernando Fernandes
Orientador
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá
Universidade Federal de Pernambuco - UEL

Prof. Dr. Aron Lopes Petrucci
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Londrina, 14 de Março de 2011.

AGRADECIMENTOS

À grande Mãe de Deus, que de todos os títulos recebidos de Seu Filho Jesus como Sede da Sabedoria e Mãe Educadora, pode receber o título ainda desconhecido de Rainha da Ciência.

A minha Família, especialmente minha esposa Márcia, por seu incentivo para esta conquista.

Ao meu orientador Prof. Fernando Fernandes, por seu empenho para o engrandecimento do Curso de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Londrina.

Aos Professores José F. T. Jucá e Aron L. Petrucci, pela dedicação aos seus alunos e à ciência no Brasil.

AUDIBERT, Jorge Luiz. **Avaliação qualitativa e quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina**. 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

RESUMO

Esse trabalho analisa a emissão de biogás do aterro controlado de Londrina/Pr e compara os valores de emissão com as estimativas de produção obtidas através de modelos matemáticos. Trata-se de um aterro de médio porte, com o início de operação na década de 70 e que no seu encerramento (novembro/2010) recebia em média 127.750 toneladas de resíduos sólidos domésticos anualmente. Foram utilizados quatro modelos matemáticos para quantificação do biogás gerado no aterro de Londrina. Paralelamente, foram realizadas três campanhas de medição "in loco", visando à obtenção de dados de emissão. Os modelos matemáticos escolhidos para quantificação do biogás foram os sugeridos por três organismos internacionais (Banco Mundial, Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)), bem como um modelo sugerido por Tchobanoglous *et al.* A aplicação das metodologias resultou em um valor teórico médio para a produção de biogás no aterro de Londrina de 34.295.802 Nm³/ano para o ano de 2010. As três campanhas de medições realizadas buscaram quantificar o biogás que vaza tanto pela camada de superfície do aterro como pelos drenos verticais de gases. Observou-se nas três campanhas que o gás metano que vaza pelos drenos verticais não ultrapassou 15,2% das emissões totais de gás metano no aterro. O valor médio da emissão de biogás nas três campanhas de medidas anotou 34.398.731 Nm³/ano, ultrapassando ligeiramente a média obtida pelos modelos matemáticos. As campanhas de medições foram realizadas em condições pluviométricas diferentes, com a primeira campanha em situação de grandes precipitações, a segunda campanha acontecendo em regime de estiagem prolongada e a terceira em início da temporada de chuvas.

Palavras chaves: Aterros. Resíduos Sólidos domésticos. Medições de gases.

AUDIBERT, Jorge Luiz. **Qualitative and quantitative evaluation of the landfill biogas from Londrina**. 2011. Dissertation (Master's Degree in Building and Sanitation Engineering) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2011.

ABSTRACT

This work examines the issue of the landfill biogas from Londrina / Pr and compare the emissions with the production estimates obtained using mathematical models. It is a medium-sized landfill, which started operating in the 70's and at its closure (November/2010) received on average 127,750 tones of domestic solid waste annually. Four theoretical methods were applied in order to quantify the biogas generated in the landfill of Londrina. At the same time, there were three measurement campaigns on the spot, to collect data. The mathematical models chosen to specify the quantity of biogas were suggested by three international agencies (World Bank, United States Environmental Protection Agency (USEPA) and the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)), as well as a model recommended by Tchobanoglous *et al.* The application of the methodology resulted in an average theoretical value for the production of biogas in the landfill of Londrina equivalent to 34,295,802 Nm³/year for the year 2010. The three measurement campaigns conducted sought to quantify the biogas that leaks not only from the surface layer of the landfill but also from vertical gas drains. It was observed in the three campaigns that the methane gas which seeps from the vertical drains did not exceed 15.2% of total emissions of methane gas in the landfill. The average emission of biogas in the three campaigns measured 34,398,731 Nm³/year, slightly exceeding the average obtained by mathematical models. The measurement campaigns were carried out in different rainfall intensity, with the first campaign in a state of heavy rainfall, the second campaign going on under the prolonged dry season and the third campaign in the early rainy season.

Keywords: Landfill. Household waste. Gas measurements.

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

- Figura 1.1:** Estudo da composição gravimétrica típica dos RSD gerados no Brasil..... 7
- Figura 1.2:** Destinação dos resíduos sólidos urbanos produzidos nos municípios do Brasil 7
- Figura 1.3:** Modelo genérico de drenagem de gases e lixiviado em um aterro sanitário..... 8
- Figura 1.4:** Esquema característico de um dreno de lixiviado e gás em aterros .9

CAPÍTULO II - ORIGEM E FATORES INFLUENCIANTES DA PRODUÇÃO DE GASES EM ATERROS

- Figura 2.1:** Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbia da matéria orgânica 14
- Figura 2.2:** Modelo gráfico da produção de gases em aterros de resíduos sólidos segundo Tabasaran 17
- Figura 2.3:** Dinâmica da geração dos principais gases componentes do biogás em aterros segundo Tchobanoglous 18

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

- Figura 3.1:** Localização do município de Londrina 34
- Figura 3.2:** Esquema típico de precipitação e número de dias com chuva em Londrina..... 35
- Figura 3.3:** Vista superior e localização do aterro controlado de Londrina..... 36
- Figura 3.4:** Levantamento planialtimétrico do aterro controlado de Londrina em outubro de 2009, com identificação de áreas de operação pela idade dos RSD depositados 37
- Figura 3.5:** Modelo triangular proposto por Tchobanoglous *et al* para os componentes lentamente e rapidamente biodegradáveis dos RSD 48
- Figura 3.6:** Vista do aterro controlado de Londrina onde se observam as áreas selecionadas conforme a idade dos RSD depositados 60
- Figura 3.7:** Corte esquemático da placa estática de fluxo utilizada para captação do biogás emitido pela camada de cobertura do aterro de Londrina 61
- Figura 3.8:** Vista da placa de fluxo assentada sobre a camada de cobertura do aterro de Londrina na primeira campanha de medidas 61
- Figura 3.9:** Vista do ensaio com tubo de inspeção para monitoramento dos gases sob a camada de cobertura do aterro de Londrina 63
- Figura 3.10:** Medições executadas em drenos verticais do aterro de Londrina64

Figura 3.11: Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na primeira campanha de medidas (outubro/2009).....	72
Figura 3.12: Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na segunda campanha de medidas (setembro/2010)	75
Figura 3.13: Monitoramento do biogás que vaza pela camada de superfície por meio dos ensaios com placa estática de fluxo no aterro de Londrina (segunda e terceira campanhas de medidas)	77
Figura 3.14: Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na terceira campanha de medidas (novembro/2010)	79
Figura 3.15: Vista geral da área 1 do aterro controlado de Londrina.....	81
Figura 3.16: Vista da área 3 e parte da área 2 do aterro controlado de Londrina	81

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 4.1: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo a partir da aplicação do modelo triangular para o aterro controlado de Londrina	92
Figura 4.2: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo a partir da aplicação do modelo USEPA para o aterro controlado de Londrina	96
Figura 4.3: Evolução da produção de gases ao longo do tempo a partir da aplicação do software Landgem 3.02 para o aterro controlado de Londrina	99
Figura 4.4: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo a partir da aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC para o aterro controlado de Londrina	103
Figura 4.5: Variação do volume de CH ₄ na placa estática de fluxo com o tempo	104
Figura 4.6: Relação da temperatura do biogás com a vazão e temperatura de CH ₄ no aterro controlado de Londrina.....	108
Figuras 4.7: Variação do volume de gás metano ao longo do tempo nos ensaios com placa estática de fluxo na segunda campanha de medidas	115
Figuras 4.8: Variação do volume de gás metano ao longo do tempo nos ensaios com placa estática de fluxo na terceira campanha de medidas	127

LISTA DE QUADROS

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO

Quadro 1.1:	Classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004/2004.....	6
--------------------	---	---

CAPÍTULO II - ORIGEM E FATORES INFLUENCIANTES DA PRODUÇÃO DE GASES EM ATERROS

Quadro 2.1:	Período médio de duração das fases de biodegradação dos RSD.....	19
Quadro 2.2:	Composição dos RSD em alguns países e em cidades brasileiras por volta do ano 2000	22
Quadro 2.3:	Componentes químicos da matéria orgânica e suas taxas de produção de metano	23
Quadro 2.4:	Composição química das bactérias metanogênicas	30
Quadro 2.5:	Composição típica do biogás gerado em aterros	31
Quadro 2.6:	Propriedades de alguns gases existentes no biogás de aterros	32
Quadro 2.7:	Alguns gases existentes em traços na composição do biogás de aterros	33

CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS

Quadro 3.1:	Dados climatológicos de Londrina	35
Quadro 3.2:	Potencial de geração de metano em função da biodegradabilidade do resíduo	40
Quadro 3.3:	Taxa de geração de metano em função da precipitação.....	41
Quadro 3.4:	Valores estimados da densidade do lixo depositado no aterro	43
Quadro 3.5:	Valores estimados de k e L ₀ em função da pluviosidade.....	44
Quadro 3.6:	Componentes dos RSD e sua faixa de biodegradação.....	47
Quadro 3.7:	Porcentagem em massa dos elementos químicos nos componentes dos RSD	47
Quadro 3.8:	Fator de correção de metano conforme as condições do aterro.....	52
Quadro 3.9:	Teor de carbono degradável para os principais componentes dos RSD	52
Quadro 3.10:	Resultados de ensaios de superfície em aterros diversos.....	57
Quadro 3.11:	Comparação entre alguns métodos de interpolação	69
Quadro 3.12:	Localização e numeração dos ensaios na primeira campanha de medidas.....	73

Quadro 3.13: Modelo de formulário para as anotações dos ensaios com placa de fluxo utilizado na segunda e terceira campanhas do aterro de Londrina	76
Quadro 3.14: Modelo de formulário utilizado para as leituras colhidas nos ensaios realizados nos drenos verticais na segunda e terceira campanhas de medidas do aterro de Londrina	76
Quadro 3.15: Localização, nome e data dos ensaios realizados na segunda campanha de medidas.....	77
Quadro 3.16: Localização, nome e data dos ensaios realizados na terceira campanha de medidas.....	80

CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Quadro 4.1: Estimativa da população e da quantidade de resíduos sólidos produzidos no município de Londrina	83
Quadro 4.2: Composição gravimétrica adotada para os RSD do município de Londrina	84
Quadro 4.3: Umidade considerada para os componentes dos RSD adotados para o município de Londrina	85
Quadro 4.4: Composição química dos componentes dos RSD	86
Quadro 4.5: Quadro geral para determinação dos coeficientes da equação estequiométrica dos RSD biodegradáveis assumidos para o aterro controlado de Londrina	87
Quadro 4.6: Taxa específica teórica da produção de biogás no aterro controlado de Londrina	89
Quadro 4.7: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina obtida com a aplicação do modelo triangular.....	91
Quadro 4.8: Aplicação do modelo triangular à diversas composições gravimétricas para avaliar cenários e estimar a produção de biogás no aterro de Londrina	93
Quadro 4.9: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina com a aplicação do modelo USEPA (1998).....	95
Quadro 4.10: Valores de parâmetros adotados no software Landgem 3.02	97
Quadro 4.11: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina com a aplicação do software Landgem 3.02	98
Quadro 4.12: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina com a aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC	102
Quadro 4.13: Resultados obtidos nos ensaios com placa de fluxo na primeira campanha de medidas	105
Quadro 4.14: Resultados dos ensaios com placa de fluxo e parâmetros do solo da camada de cobertura do aterro de Londrina	106

Quadro 4.15: Resultados dos ensaios com tubo de inspeção abaixo da camada de cobertura do aterro de Londrina	106
Quadro 4.16: Resumo dos resultados obtidos nos drenos verticais do aterro de Londrina	107
Quadro 4.17: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais do aterro controlado de Londrina na primeira campanha de medidas	109
Quadro 4.18: Resultados calculados para os ensaios com placa de fluxo na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	117
Quadro 4.19: Avaliação da média dos resultados do fluxo de gás metano obtido nos ensaios com placa de fluxo conforme as áreas do aterro de Londrina em que estavam inseridos na segunda campanha de medidas	118
Quadro 4.20: Resultados calculados para os ensaios realizados nos drenos na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	119
Quadro 4.21: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	121
Quadro 4.22: Resultados quantitativos de gás carbônico obtidos na superfície e nos drenos verticais na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	122
Quadro 4.23: Resultados calculados para os ensaios com placa de fluxo na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	129
Quadro 4.24: Avaliação da média dos resultados de fluxo de gás metano obtidos com placa de fluxo conforme as áreas do aterro de Londrina em que estavam inseridos na terceira campanha de medidas	130
Quadro 4.25: Resultados obtidos nos ensaios realizados nos drenos verticais na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina	131
Quadro 4.26: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais do aterro controlado de Londrina na terceira campanha de medidas	132
Quadro 4.27: Resultados quantitativos de gás carbônico obtidos na superfície e nos drenos verticais do aterro controlado de Londrina na terceira campanha de medidas	134
Quadro 4.28: Resumo dos resultados obtidos para o aterro controlado de Londrina por meio dos modelos matemáticos e das três campanhas de medidas	135
Quadro 4.29: Valores de precipitação nos anos de 2009 e 2010	140

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
CH ₄	Gás metano
CO ₂	Dióxido de carbono ou gás carbônico
COD	Carbono orgânico degradável
COD _F	Fração do carbono orgânica degradável efetivamente degradada
F	Fração de metano no biogás
FCM	Fator de correção do metano
H ₂ S	Gás sulfídrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IQD	Inverso do quadrado da distância
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
k	Taxa de geração de metano
L ₀	Potencial de geração de metano
m _i	Massa de resíduos depositada no ano i
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
NMOC	Compostos orgânicos não metânicos
NBR	Norma Brasileira Registrada
O ₂	Gás oxigênio ou oxigênio molecular
OX	Fator de oxidação
pH	Potencial hidrogeniônico
R	Média anual de lixo depositado no aterro
RSU	Resíduos sólidos urbanos
RSD	Resíduos sólidos domésticos
USEPA	Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
VOC	Compostos orgânicos voláteis

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações gerais	1
1.2. Contextualização geral da pesquisa	2
1.3. O efeito estufa	3
1.4. Objetivos da pesquisa	4
1.5. Legislação e conceitos básicos	5
CAPÍTULO II - ORIGEM E FATORES INFLUENCIANTES DA PRODUÇÃO DE GASES EM ATERROS	10
2.1. Microbiologia da biodigestão anaeróbia	10
2.1.1. Fases da biodigestão anaeróbia	11
2.2. Fatores característicos da produção de gases em aterros	14
2.3. Fases da biodegradação dos RSD em aterros.....	17
2.4. Fatores que influenciam a produção de gases em aterros	20
2.4.1. Composição física dos resíduos sólidos domésticos (RSD).....	20
2.4.2. Composição química dos RSD.....	22
2.4.3. Umidade dos RSD.....	23
2.4.4. Índices pluviométricos regionais	24
2.4.5. Temperatura	25
2.4.6. Temperatura externa	26
2.4.7. Potencial hidrogeniônico (pH)	27
2.4.8. Potencial de óxido-redução	28
2.4.9. Nutrientes químicos.....	29
2.4.10. Produtos tóxicos	30
2.5. Composição do biogás produzido em aterros	31
CAPÍTULO III - MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. O aterro controlado de Londrina	34
3.2. Modelos matemáticos de previsão da produção de biogás	38
3.2.1. Modelo de primeira ordem adotado pelo Banco Mundial	39

3.2.2. Modelo de primeira ordem adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA).....	42
3.2.3. Software Landgem 3.02 (USEPA, 2005).....	45
3.2.4. Modelo multi-fase sugerido por Tchobanoglous et al (1993).....	46
3.2.5. Modelo de primeira ordem adotado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)	50
3.3. Medida das emissões de biogás	55
3.3.1. Seleção de áreas para avaliar os gases nas campanhas de medidas do aterro controlado de Londrina	59
3.3.2. Métodos utilizados para avaliar os gases que são emitidos pela superfície do aterro.....	60
3.3.3. Método utilizado para avaliar os gases emitidos pelos drenos verticais do aterro	63
3.3.4. Equipamentos utilizados para realização dos ensaios no aterro controlado de Londrina	64
3.3.5. Formulação utilizada para tratamento dos dados colhidos nos ensaios com placa de fluxo	65
3.3.6. Formulação utilizada para tratamento dos dados colhidos nos ensaios realizados nos drenos verticais	67
3.3.7. Tratamento estatístico dos resultados de emissão superficial de gases obtidos nos ensaios com placa de fluxo	68
3.3.8. Método utilizado para quantificação de gases no aterro controlado de Londrina.....	69
3.3.9. Localização dos pontos de ensaios na primeira campanha de medidas	71
3.3.10. Localização dos pontos de ensaios na segunda campanha de medidas.....	74
3.3.11. Localização dos pontos de ensaios na terceira campanha de medidas.....	78
CAPÍTULO IV - RESULTADOS E DISCUSSÕES	82
4.1. Avaliação quantitativa dos resíduos sólidos contidos no aterro controlado de Londrina	82
4.2. Considerações sobre a composição dos RSD do município de Londrina	83

4.3. Aplicação do modelo triangular de Tchobanoglous <i>et al</i> para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina	85
4.4. Aplicação do modelo de primeira ordem adotado pela USEPA para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina	93
4.5. Aplicação do software Landgem 3.02 para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina	97
4.6. Aplicação do modelo de primeira ordem adotado pelo IPCC para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina	99
4.7. Medidas experimentais da emissão de biogás no aterro controlado de Londrina	104
4.7.1. Resultados obtidos na primeira campanha de medidas.....	104
4.7.2. Resultados obtidos na segunda campanha de medidas.....	111
4.7.3. Resultados obtidos na terceira campanha de medidas	123
4.8. Discussão geral de resultados.....	134
4.8.1. Considerações finais sobre a aplicação do modelo triangular de Tchobanoglous <i>et al</i>	135
4.8.2. Considerações finais sobre a aplicação do modelo USEPA.....	136
4.8.3. Considerações finais sobre a aplicação do software Landgem 3.02	137
4.8.4. Considerações finais sobre a aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC.....	138
4.8.5. Considerações finais sobre a primeira campanha de medidas	138
4.8.6. Considerações finais sobre a segunda campanha de medidas	140
4.8.7. Considerações finais sobre a terceira campanha de medidas	141
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES FINAIS	143
SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS	146
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	147
ANEXO A: Planilhas de cálculo dos ensaios de superfície da segunda campanha de medidas	152
ANEXO B: Coordenadas dos pontos de ensaio de superfície nas campanhas de medidas	170

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

1.1. Considerações Gerais

Acreditava-se no passado que a natureza seria capaz de absorver qualquer quantidade de resíduos antropogênicos sem causar incômodo às comunidades geradoras. A disposição de resíduos sólidos urbanos ou industriais diretamente nos solos foi uma prática realizada por séculos. Somente a partir de grandes situações nitidamente insalubres causadas à sociedade por depósitos de resíduos, iniciou-se uma observação mais apurada sobre os mesmos.

A observação dos resultados originados pela deposição de grandes quantidades de resíduos sólidos levou a uma análise do entorno, objetivando quantificar o impacto ambiental. Verificou-se principalmente a produção de percolado que contaminava as águas vizinhas e também a produção de gases.

A produção e disposição de resíduos sólidos produzidos nos centros urbanos são especialmente relevantes nos países em desenvolvimento. Os centros urbanos constituem em suas periferias grandes aterros para os resíduos sólidos gerados pela sociedade de consumo atual.

Pelo fato dos resíduos sólidos urbanos serem posteriormente cobertos por camadas de solo, prevalece o processo de biodegradação anaeróbia desses resíduos, principalmente nas camadas profundas. O impacto ambiental do material líquido e sólido produzido na biodegradação anaeróbia é verificado especialmente nos arredores dos aterros, na forma de contaminação dos rios e nascentes de águas próximas. Pode contaminar também o lençol freático da região pela infiltração do lixiviado no solo da base do aterro. No entanto, o impacto ambiental dos gases provenientes da biodegradação anaeróbia se mostra sensível somente para os moradores da região do aterro, por causa do odor desagradável de alguns desses gases e das doenças que podem ser causadas por outros.

Estima-se que o gás metano, principal componente do biogás, seja aproximadamente 21 vezes mais nocivo para o incremento do efeito estufa que o gás carbônico. O gás metano tem grande capacidade de reter parte da radiação infravermelha refletida da terra para a atmosfera. A diluição da contaminação dos gases na atmosfera do planeta dificulta o

crescimento da consciência da população com relação aos impactos ambientais desses gases. Como agravante, verifica-se que mesmo em países desenvolvidos ainda não se constata a priorização efetiva da diminuição da emissão de gases responsáveis pelo aquecimento global.

Alternativas de utilização do biogás são ainda incipientes em pequenos e médios aterros do Brasil. A queima do gás metano em aterros contribui para a mitigação do aquecimento global, mas o gás pode ser também aproveitado como gerador de energia elétrica. Os Mecanismos de Desenvolvimento Limpo (MDL), coordenados pelo Banco Mundial, têm pouca divulgação e se mostram ainda distantes da realidade dos pequenos e médios municípios. A tarefa de dominar tecnologicamente a situação dos aterros e incluir o Brasil no cenário dos países que se ocupam com a defesa do meio ambiente neste contexto depende diretamente dos resultados das pesquisas referentes à matéria em questão.

1.2. Contextualização geral da pesquisa

O gás resultante da biodegradação anaeróbia é comumente chamado biogás e apresenta uma composição média de 50% de gás metano, 40% de gás carbônico e traços de gás sulfídrico, amônia, hidrogênio e oxigênio. A variabilidade de sua composição alinha-se diretamente aos componentes dos resíduos sólidos a serem biodecompostos, bem como a outras variáveis como temperatura, umidade, pH, etc.

O processo de biodecomposição anaeróbia tem sido amplamente estudado em situações controladas, o que levou ao desenvolvimento de diversos tipos de biodigestores. No entanto, em aterros e lixões não se tem controle das variáveis envolvidas.

Os estudos realizados nos países desenvolvidos levaram diversas entidades internacionais a proporem modelos matemáticos para a previsão da produção de biogás nos aterros de resíduos sólidos. Inicialmente os modelos apresentavam como pressupostos de origem dados típicos de países do hemisfério norte, com desenvolvimento industrial e tecnológico diferenciado dos países em desenvolvimento. Atualmente, observa-se que países em desenvolvimento apresentam composição física típica dos resíduos sólidos diferente da composição característica dos países desenvolvidos, entre outras diferenças.

De forma geral, nos países em desenvolvimento a composição física dos resíduos sólidos urbanos tem maiores quantidades de matéria orgânica que nos países desenvolvidos. O clima de um país também influencia a produção do biogás, pois variações sazonais de temperatura e teor de umidade disponível no ar alteram significativamente o processo de biodigestão anaeróbia.

No Brasil, a matéria orgânica representa de 40 a 60% do peso total dos resíduos sólidos urbanos. A quantidade de matéria orgânica presente nesses resíduos é fundamental na produção de subprodutos, principalmente do biogás. Sua composição é basicamente formada de polissacarídeos, como proteínas, carboidratos e lipídios que são os combustíveis principais para a produção de gases e lixiviados.

O Banco Mundial, a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) e o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) são algumas das grandes organizações internacionais que se ocupam com a estimativa de gases causadores do efeito estufa. Aplicando as proposições matemáticas ao aterro de Londrina podem-se obter estimativas da produção de biogás para o mesmo.

1.3. O efeito estufa

O aquecimento global é definido como o acréscimo da temperatura média do planeta em consequência do aumento da concentração atmosférica de alguns gases, tais como o gás carbônico, os clorofluorcarbonos, o metano, o óxido nitroso entre outros menos importantes.

O aumento da temperatura tem causado o derretimento das geleiras do Ártico, Antártico e cumeeiras de cadeias montanhosas. O fenômeno é responsável por mudanças significativas no clima do planeta, como verões com temperaturas mais elevadas e invernos com temperaturas mais baixas, aumento do nível do mar, gradual desaparecimento de países insulares, incremento de problemas de desertificação, alterações de vocações agrícolas, migração de doenças tropicais, entre outros.

O incremento dos gases de efeito estufa na atmosfera data do século XIX, com o advento da revolução industrial e o consumo progressivo de combustíveis fósseis. Além do gás carbônico, o gás metano tem aumentado consideravelmente na atmosfera, principalmente

por ação antropogênica. Estima-se que 66% das emissões totais de gás metano sejam por ação humana, principalmente pela agricultura, pecuária e aterros de resíduos sólidos. A geração de biogás por um aterro pode ter uma sobrevida de vários anos após seu fechamento, dependendo dos diversos fatores envolvidos no processo anaeróbio.

Em função dos graves eventos e buscando-se a mitigação da ação antrópica sobre a mudança do clima, instituiu-se o Protocolo de Quioto em 1997 com a participação de 167 países. O objetivo principal do protocolo foi estabelecer limites para emissão de gases de efeito estufa pelos países, criando inclusive possibilidades econômicas utilizando papéis de comprovação de não emissão. As medidas propostas pelo protocolo, se efetivamente cumpridas, possibilitariam a renovação da matriz energética utilizada atualmente, originando uma nova revolução industrial.

Entretanto, próximo ao encerramento dos prazos do Protocolo (2012), observa-se ainda certa inércia de países pouco persuadidos das alterações climáticas globais e mais preocupados com questões econômicas internas. O mercado criado para papéis que contabilizam o sequestro do carbono que seria emitido para a atmosfera ainda se mostra incerto.

1.4. Objetivos da pesquisa

A pesquisa teve por objetivo geral:

- Medir a emissão de biogás no aterro controlado de Londrina e comparar os dados de emissão com os valores de geração obtidos com a aplicação de modelos matemáticos.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Medir as emissões de biogás do aterro controlado de Londrina.
- Aplicar modelos matemáticos para avaliar a produção de biogás do aterro controlado de Londrina.
- Estimar a produção de biogás após o encerramento das atividades do aterro.

1.5. Legislação e conceitos básicos

No decorrer da história e até a revolução industrial do século XVIII os resíduos sólidos eram constituídos essencialmente por restos alimentares oriundos dos núcleos urbanos. A partir deste século e com o surgimento das indústrias, o quadro começou a mudar. As indústrias necessitavam embalar seus produtos para transporte e aumento da vida útil. O fenômeno incrementou novos tipos de lixo e aumentou o volume de lixo produzido pelos centros urbanos.

As embalagens produzidas pelas indústrias se diversificaram simultaneamente ao aumento de consumo. O conceito dos “descartáveis” foi introduzido na história, aumentando consideravelmente a quantidade de lixo produzido e gerando as chamadas “sociedades de consumo”. Os problemas causados pela disposição final do lixo se estenderam à saúde pública e ao meio ambiente. Surgiu também o lixo industrial, subproduto de difícil destinação e tratamento.

Essa colocação abreviada orienta o pensamento para os motivos pelos quais o lixo urbano se tornou um grande problema para a sociedade moderna. Lixo, na linguagem técnica, é sinônimo de resíduos sólidos, e é concebido como materiais descartados pelas atividades humanas. O termo resíduo sólido (RS) é empregado como um equivalente técnico do termo lixo.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), através da NBR 10.004/2004, define resíduo sólido com os seguintes termos:

Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

A NBR 10.004/2004 apresenta a classificação dos resíduos sólidos (RS), motivada pela elevada produção de resíduos e pela sua heterogeneidade. O critério essencial utilizado para classificação dos resíduos é o grau de periculosidade, conforme apresentado no quadro 1.1.

Quadro 1.1 – Classificação dos resíduos segundo a NBR 10.004/2004

Classe/Conceito	Materiais
<p>Classe I - Perigosos</p> <p>Resíduos perigosos: que apresentam pelo menos uma destas características especificadas em norma: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade, patogenicidade.</p>	<p>Anexo A (NBR10004/04): resíduos perigosos de fontes não especificadas</p> <p>Anexo B (NBR10004/04): resíduos perigosos de fontes especificadas</p> <p>Anexo C (NBR10004/04): substâncias que conferem periculosidade aos resíduos</p> <p>Anexo D (NBR10004/04): substâncias agudamente tóxicas</p> <p>Anexo E (NBR 10004/04): substâncias tóxicas</p>
<p>Classe II – Não Perigosos</p> <p>II A – Não Inertes</p> <p>Resíduos que podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.</p>	<p>Anexo H (NBR 10004/04): codificação de alguns resíduos classificados como não perigosos:</p> <p>Resíduos de restaurante (restos de alimentos), resíduo de madeira, sucata de metais ferrosos, resíduos de materiais têxteis, sucata de metais não ferrosos (latão, etc.), resíduos de minerais não metálicos, resíduo de papel e papelão, areia de fundição, resíduos de plástico polimerizado, bagaço de cana, resíduos de borracha. Outros resíduos não perigosos.</p>
<p>Classe II – Não Perigosos</p> <p>II B – Inertes</p> <p>Resíduos que, quando submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou desionizada, à temperatura ambiente, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor,</p>	

Fonte: adaptado da NBR 10.004/2004

Os resíduos sólidos pertencentes às classes “I” e “II b” têm origem preponderante em lixo não doméstico. Esse trabalho utiliza o termo “resíduos sólidos domésticos” (RSD) quando se dirige aos resíduos depositados nos aterros municipais, como forma de especificar o tipo de resíduo que orienta o foco do estudo.

Os RSD no Brasil apresentam composição gravimétrica característica com maior parcela de matéria orgânica. A figura 1.1 mostra a composição gravimétrica dos RSD no Brasil apresentada por Figueiredo (2009). A pesquisa tem por base números da Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE).

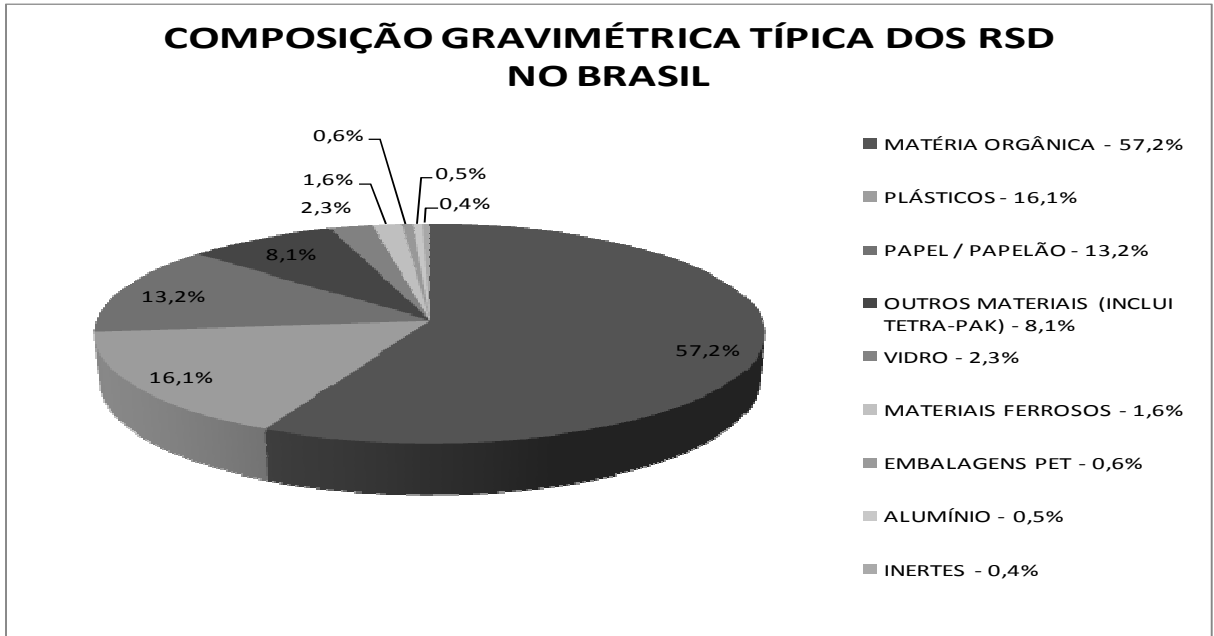


Figura 1.1: Estudo da composição gravimétrica típica dos RSD gerados no Brasil
Fonte: FIGUEIREDO (2009)

Parcela considerável dos resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos no Brasil tem destinação inadequada. A figura 1.2 mostra a destinação dos resíduos sólidos urbanos no Brasil, segundo os dados da ABRELPE (2009). Os dados mostram as dificuldades da administração pública municipal em gerir a destinação final dos resíduos sólidos produzidos.



Figura 1.2: Destinação dos resíduos sólidos urbanos produzidos nos municípios do Brasil
Fonte: ABRELPE (2009)

Os aterros controlados são formas de destinação dos RSD que objetivam mitigar os riscos ao meio ambiente e à saúde pública. O Manual de Gerenciamento do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 1995) apresenta os aterros controlados como lugares de destinação onde os resíduos sólidos são depositados e cobertos por uma camada de solo ou outro material inerte ao final de cada jornada de trabalho. O procedimento de operação do aterro controlado minimiza riscos à saúde da população, diminuindo odores desagradáveis e contendo parcialmente a proliferação de vetores.

Uma característica dos aterros controlados se orienta para o fato de não disporem de impermeabilização em sua base. Isso pode propiciar a contaminação do solo por meio dos subprodutos gerados na massa de lixo, sobretudo o lixiviado (também conhecido como chorume). A contaminação pode alcançar o lençol freático, poços ou mesmo pequenas minas próximas do aterro. Alguns aterros controlados possuem lagoa para tratamento do lixiviado como meio de controlar a contaminação do local.

Os aterros sanitários se apresentam como soluções mais completas para a disposição final dos RSD. Nesse tipo de disposição as células são impermeabilizadas com geomembranas para evitar contaminação do solo ou mesmo do lençol freático. Os subprodutos gerados são orientados para drenos previamente projetados, de forma a se obter maior controle sobre os mesmos. A figura 1.3 mostra um modelo genérico de disposição dos drenos de gases e lixiviado no ambiente interno da massa de lixo em um aterro sanitário.



Figura 1.3: Modelo genérico de drenagem de gases e lixiviado em um aterro sanitário
Fonte: QUITAUNA (2010)

Para serem caracterizados como aterros sanitários, os aterros devem dispor de drenos de águas pluviais superficiais, poços de inspeção, sistemas de tratamento de percolados, monitoramento de aquíferos, estrutura de transbordo, mata ciliar e cobertura vegetal. Devem existir também todos os controles necessários ao bom funcionamento e operação. Os caminhões devem ser pesados antes de serem descarregados no aterro. A figura 1.4 mostra o esquema típico de um dreno de gases e lixiviado, com suas dimensões aproximadas e suas características no interior da massa de lixo.

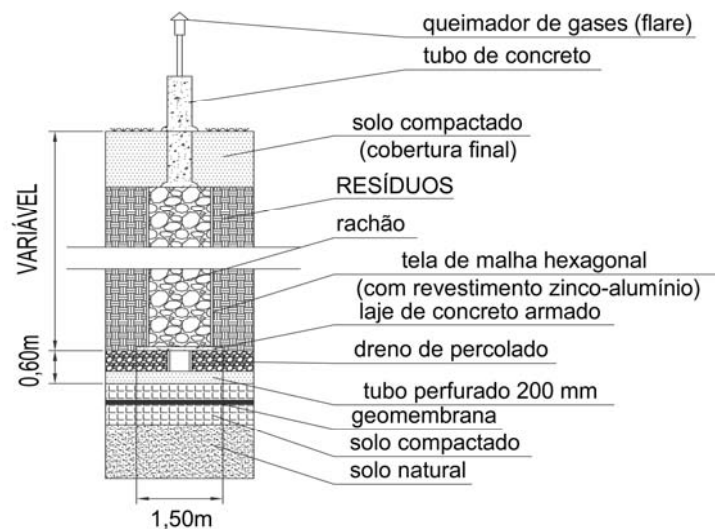


Figura 1.4: Esquema característico de um dreno de lixiviado e gás em aterros
Fonte: VT ENGENHARIA (2010)

CAPÍTULO II – ORIGEM E FATORES INFLUENCIANTES DA PRODUÇÃO DE GASES EM ATERROS

2.1. Microbiologia da biodigestão anaeróbia

A conversão da matéria orgânica em biogás percorre um caminho longo e complexo, motivo de estudos iniciados objetivamente no século XIX. Atribui-se a Hamphrey Davy a identificação de um gás composto basicamente por metano e dióxido de carbono no ano de 1806, resultante da decomposição de dejetos de animais.

A transformação da matéria orgânica dos RSD em biogás e outros subprodutos se realiza pelo metabolismo bacteriano, tendo uma participação pequena de fungos e outros microorganismos. As bactérias (do grego *bakteria*, traduzido como bastão) são microorganismos unicelulares que não apresentam seu material genético compartimentado por membranas (procariontes), podendo existir isoladamente ou em colônias. Alguns tipos de bactérias necessitam do oxigênio para realizar seu metabolismo, e são chamadas aeróbias. Outras não suportam a presença de oxigênio e são chamadas anaeróbias. Existe ainda um terceiro tipo de bactérias capaz de sobreviver e operar suas atribuições tanto em presença como em ausência de oxigênio, sendo chamadas facultativas.

A biodegradação pelo processo anaeróbio pode ser subdividida em etapas ou fases. Em cada fase prevalece o trabalho de determinado tipo de bactéria; no entanto essa prevalência não é absoluta, o que torna as inter-relações complexas. As interações entre os diversos grupos de bactérias participantes da decomposição anaeróbia têm múltiplas variáveis, que vão desde a dependência comensal entre elas até variáveis externas como temperatura e pH do meio, por exemplo. No contexto interno do meio biológico, em cada uma das fases existe a produção de subprodutos necessários ao trabalho das bactérias de outra fase. A interação comensal entre as bactérias pode ser inibida por uma superpopulação de bactérias em uma das fases da biodigestão anaeróbia.

A matéria orgânica é composta basicamente por carboidratos, lipídios e proteínas. Os carboidratos são substâncias formadas por carbono, oxigênio e hidrogênio, ou resumidamente carbono e água. Em geral são macromoléculas formadas por milhares de

moléculas menores. As duas funções principais dos carboidratos são a de reserva nutritiva e a de elemento estrutural das células. Os lipídios são biomoléculas compostas também por carbono, oxigênio e hidrogênio, porém, com a característica de serem insolúveis em água e solúveis em solventes orgânicos como álcool, benzina, clorofórmio e acetona. Contêm maior valor energético que os carboidratos, mas as células dão preferência aos carboidratos. As proteínas são os compostos mais importantes do ponto de vista estrutural das células. São compostos orgânicos de alto peso molecular formados por um conjunto de no mínimo oitenta aminoácidos.

2.1.1. Fases da biodigestão anaeróbia

O processo de decomposição da fração orgânica dos RSD inicia-se pelo ataque dos microrganismos à matéria orgânica sólida presente. Na fase aeróbia podem ser verificadas outras estirpes de micro-organismos presentes, como certos fungos e protozoários, além das bactérias.

Alguns autores descrevem a decomposição da fração orgânica dos RSD em duas fases fundamentais: aeróbia e anaeróbia. A aerobiose no processo de biodecomposição dos RSD ocorre em grande velocidade até a extinção do oxigênio disponível. Isto porque a estirpe de bactérias aeróbias consome grande quantidade de oxigênio e se desenvolve rapidamente. As condições comumente encontradas na massa em biodigestão para esta fase são: temperatura entre 30°C e 70°C e pH acima de 7,0 (LIMA, 1995).

A decomposição anaeróbia dos RSD é a etapa mais complexa e demanda mais tempo. Engloba no mínimo quatro fases de decomposição à parte, iniciando com a Hidrólise, passando pelas fases Acidogênica e Acetogênica, chegando à fase Metanogênica. Alguns autores sugerem a inclusão de uma quinta fase, dependendo da presença de enxofre nos resíduos: Sulfetogênese. Comumente nas caracterizações do biogás produzido em aterros encontram-se quantidades pequenas de gás sulfídrico.

Hidrólise: é uma reação química em que a água efetua a troca de seus componentes com outro composto, propiciando o surgimento de novos compostos. Na bioquímica do processo, esta fase envolve um grupo de bactérias denominadas fermentativas. A matéria orgânica grande e complexa não pode ser absorvida diretamente, necessitando ser

particulada. Esse processo acontece pela excreção de enzimas pelas bactérias fermentativas, propiciando a hidrólise de polímeros em monômeros.

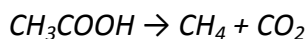
Acidogênese: nesta fase ocorrem reações nas quais são formados ácidos pela ação de um grupo de bactérias denominadas fermentativas acidogênicas. Essas bactérias são capazes de metabolizar os monômeros resultantes da hidrólise e excretar compostos mais simples, como ácidos graxos voláteis, alcoóis, ácido láctico, gás carbônico, hidrogênio, amônia, além de exercerem a reprodução de suas fileiras, gerando novas células bacterianas. A grande maioria das bactérias acidogênicas são anaeróbias estritas, não suportando a presença de oxigênio. Por isso, as poucas bactérias facultativas existentes no meio (cerca de 1%) atuam como proteção das bactérias anaeróbias estritas, pois consomem o oxigênio que porventura exista (CHERNICHARO, 2000).

Acetogênese: nas interações comensais existentes na anaerobiose, os produtos excretados pelas bactérias fermentativas (açúcares, ácidos orgânicos, alcoóis e aminoácidos) são metabolizados por um grupo de bactérias acetogênicas, as quais os convertem em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono. Essas bactérias fazem parte de um grupo intermediário de bactérias, pois o substrato delas será metabolizado pelas bactérias metanogênicas. A acetogênese é essencial no processo de geração de gases e uma superpopulação dessas bactérias poderá desequilibrar o processo anaeróbio através da geração excessiva de hidrogênio. O hidrogênio em excesso procede a diminuição do pH no meio, tornando-o excessivamente ácido. Caso as bactérias metanogênicas não estejam em quantidade suficiente ou estejam em condições desfavoráveis de metabolização, a produção de gases será alterada. O hidrogênio produzido pelas bactérias acetogênicas pode ser consumido diretamente pelas bactérias metanogênicas na produção de metano e dióxido de carbono, ou ainda pode reagir com o dióxido de carbono e com o ácido acético, produzindo outros ácidos orgânicos, como o propiônico e o butírico. As condições de contorno ideais para a maximização da fase acetogênica são: temperatura entre 29°C e 45°C e pH na faixa de 5,2 a 6,5.

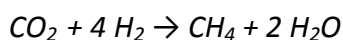
Metanogênese: é a fase final do processo anaeróbio de formação de gases. Nas fases anteriores são gerados substratos como monóxido e dióxido de carbono, hidrogênio, metanol e ácido acético. Existem dois grupos principais de bactérias que atuam nesta fase.

Um grupo metaboliza o acetato oriundo da fase anterior da anaerobiose e recebe o nome de bactérias acetoclásticas. Outro grupo utiliza o hidrogênio para redução do dióxido de carbono e são denominadas hidrogenotróficas. As condições aproximadas em que ocorre a fase metanogênica comumente apresenta temperatura entre 22°C e 37°C e pH na faixa de 6,8 a 7,2.

Metanogênicas acetoclásticas: grande parte da produção de metano na fase metanogênica é responsabilidade deste gênero de bactérias (60% a 70%), sendo também o gênero predominante nessa fase. Existem dois tipos principais de bactérias acetoclásticas: Methanosarcina e Methanosaeta. O primeiro se desenvolve na forma de cocos e são as mais versáteis por utilizarem inclusive o hidrogênio. O segundo grupo utiliza exclusivamente o acetato no seu metabolismo. De forma geral, na bioquímica da atuação dessas bactérias, o metano é produzido a partir da redução do ácido acético, originado a partir da seguinte reação química:



Metanogênicas hidrogenotróficas: a grande maioria das bactérias metanogênicas é capaz de utilizar o hidrogênio para produzir metano. No entanto, existem em menor quantidade na fase metanogênica que as bactérias acetoclásticas. São responsáveis por consumir o hidrogênio existente no meio e propiciar a produção de ácidos pelas bactérias acidogênicas e acetogênicas. No processo bioquímico as bactérias hidrogenotróficas atuam reduzindo o dióxido de carbono e produzindo a reação catabólica:



Sulfetogênese: nesta fase os compostos à base de enxofre, como os sulfatos, são reduzidos a sulfetos por um grupo de bactérias denominadas bactérias sulforedutoras. Podem utilizar diversos substratos de outras fases da digestão anaeróbia como metanol, etanol, os açúcares, o hidrogênio, ácidos graxos entre outros. O resultado final é a produção de gás sulfídrico e dióxido de carbono. Na ausência de sulfatos na massa de lixo o gás sulfídrico não é produzido.

A figura 2.1 exibe as rotas metabólicas características e os grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbica da matéria orgânica.

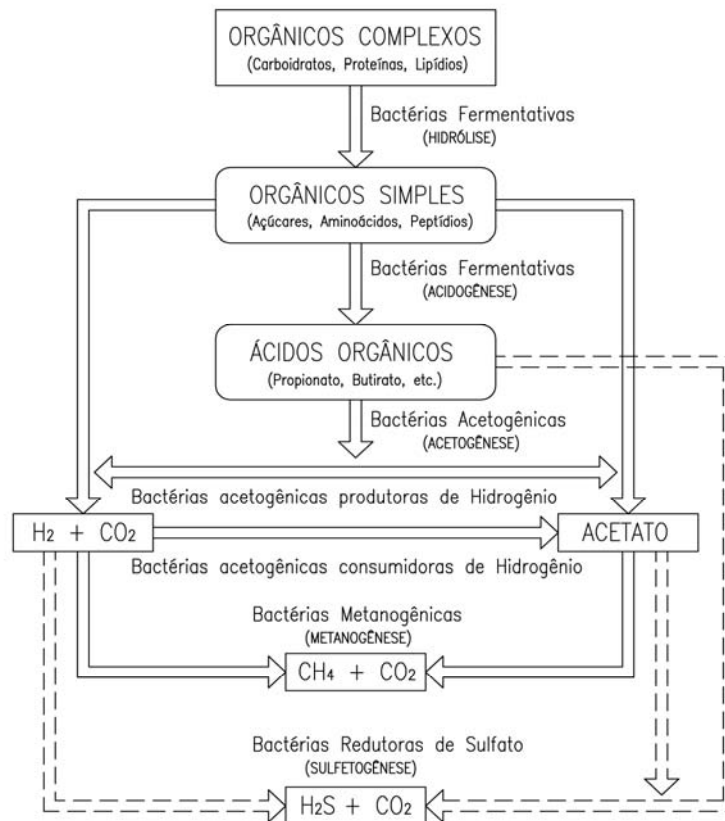


Figura 2.1: Sequências metabólicas e grupos microbianos envolvidos na biodegradação anaeróbica da matéria orgânica

Fonte: CHERNICHARO (2000)

2.2. Fatores característicos da produção de gases em aterros

A rigor, o processo de biodecomposição se inicia dentro dos próprios sacos de lixo utilizados para recolherem a matéria orgânica dissolvida no contexto dos RSD. Em algumas situações, os sacos ficam depositados nas calçadas públicas por mais de um dia, até serem recolhidos pelo sistema de coleta municipal e transportados ao depósito de lixo.

Nos depósitos de lixo comumente os resíduos sólidos são descarregados a céu aberto, principiando efetivamente um processo de decomposição aeróbia, em meio à grande quantidade de oxigênio ainda presente na massa de lixo e pelo próprio oxigênio atmosférico. O tempo de exposição dos RSD ao sol e ao ambiente atmosférico depende das condições de gerenciamento do aterro, envolvendo inclusive a disponibilidade de solo para executar a

cobertura do lixo. Em alguns municípios a cobertura da massa de lixo é diária, mas em outros este procedimento pode levar dias ou semanas.

A composição gravimétrica dos RSD está ligada, em geral, às condições socioeconômicas da região. Municípios com maior consumo de alimentos ou presença de coletas seletivas, que extraem dos RSD alguns elementos para reciclagem como plásticos, vidros e metais, têm diferenças na composição física típica de seus resíduos sólidos.

O processo de conversão da matéria orgânica em biogás nos aterros envolve um complexo sistema de interações físico-químicas e biológicas, em um contexto de múltiplas variáveis. Maciel (2003) apresenta quatro fatores fundamentais para o processo: geometria e operação do aterro, características iniciais dos resíduos, ambiente interno da massa de lixo e ambiente externo da massa de lixo.

A geometria do aterro influencia diretamente os processos anaeróbios. Na maior parte dos aterros a vedação da massa de lixo é realizada por meio de uma fina camada de solo compactado, principalmente pela dificuldade de obtenção e custos de transporte desse material. A fina camada de solo pode permitir a entrada de oxigênio para o interior do lixo, inibindo a ação dos micro-organismos anaeróbios no processo de biodegradação dos RSD. Nesses casos, verifica-se a ação predominante da biodigestão anaeróbica em profundidades superiores a 3 metros (JUCA *et al*, 2005).

A compactação do aterro também influencia diretamente a biodegradação da massa de lixo, pois sua maximização diminui consideravelmente a presença de oxigênio no interior do mesmo. Além da compactação da massa de lixo, a compactação da camada de cobertura bem como a granulometria do solo utilizado corroboram para a minimização da infiltração de águas pluviais, evitando que o oxigênio dissolvido nestas águas seja carregado para o interior dos RSD.

Quanto a características dos RSD depositados no aterro, a composição gravimétrica e a umidade são fatores primordiais na geração dos gases e na geração do lixiviado. Fundamentalmente um aterro opera como um grande biodigestor, onde os resíduos sólidos são depositados com sua umidade característica e a biodigestão gera seus subprodutos: o

lixiviado e o biogás. Quanto maior a disponibilidade de matéria orgânica biodegradável nos RSD, maior a quantidade dos subprodutos.

A presença de água na massa de lixo é fundamental para a hidrólise de seus componentes e consequente absorção pelos microorganismos. As pesquisas têm apresentado variação nos índices de umidade dos RSD depositados em aterros e com taxas significativas de produção de gases. Uma provável explicação para a amplitude de valores pode estar vinculada a outros fatores influenciadores, como o próprio clima do país em questão. Temperaturas baixas podem retardar o processo anaeróbio, enquanto que índices pluviométricos elevados podem contribuir para acelerar a biodigestão dos RSD. No aterro da Muribeca/Pe observaram-se altas taxas de decomposição para índices de umidade entre 20 e 40%, considerados relativamente baixos (JUCA *et al*, 2005).

No ambiente interno da célula de lixo existem vários fatores de grande importância na geração de gases e lixiviado. Além da umidade e da disponibilidade de nutrientes, o potencial hidrogeniônico (pH) da massa de lixo, a temperatura interna e a presença de agentes químicos inibidores, como metais pesados e ácidos, podem influenciar na caracterização e na quantificação dos subprodutos gerados. A influência dos fatores citados está diretamente relacionada ao delicado processo biológico dos microorganismos e suas múltiplas inter-relações.

No ambiente externo da decomposição, as variações climatológicas são os principais fatores influenciadores da biodegradação dos resíduos sólidos. Índices pluviométricos elevados podem carrear quantidades elevadas de água para a massa de lixo, em conjunto com grande quantidade de oxigênio dissolvido na água. O oxigênio inibe a ação das bactérias anaeróbias estritas, promovendo o aumento da população de bactérias aeróbias nas camadas mais elevadas da célula do aterro. Os gradientes de temperatura oriundos da sazonalidade do clima de cada região podem induzir a temperatura do interior da massa de lixo, promovendo alterações significativas no processo de biodegradação dos RSD. As pesquisas realizadas no aterro da Muribeca/Pe mostraram que a influência externa da temperatura atinge profundidades de até 2,5 metros (JUCA *et al*, 1999).

2.3. Fases da biodegradação dos RSD em aterros

Nas últimas décadas os estudos da geração de gases em aterros foram se aprimorando. Várias sugestões de modelos representativos das fases de biodecomposição dos RSD foram apresentadas. Os modelos gráficos associam as fases de decomposição com o tempo em que elas se perpetuam ativas na massa de lixo. Estabelecem também as variações nas produções dos diversos gases que compõem o biogás originado nos aterros. A figura 2.2 apresenta as diversas fases da biodegradação anaeróbia em aterros segundo Tabasaran (1975).

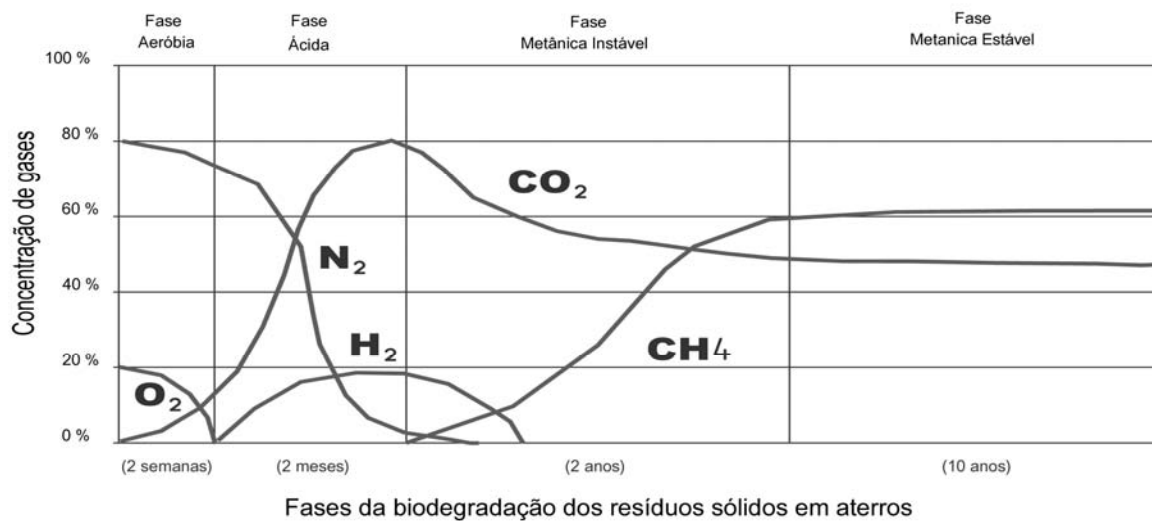


Figura 2.2: Modelo gráfico da produção de gases em aterros de resíduos sólidos segundo Tabasaran

Fonte: TABASARAN (1975), apud LIMA (1995)

A ordenação das fases exhibe inicialmente a fase aeróbia, em um período de tempo relativamente curto (2 semanas), devido ao consumo rápido de oxigênio pelas bactérias aeróbias e sua grande capacidade de reprodução. A ação exotérmica das bactérias na fase faz com que a massa de lixo em decomposição alcance parâmetros de temperatura entre 45°C e 68°C.

Com o declínio da quantidade de oxigênio no meio ocorre a anaerobiose da decomposição, inicialmente por meio das bactérias fermentativas acetogênicas. Essas bactérias, por hidrólise, liberam ácidos, lipídios e proteínas. A fase da decomposição anaeróbia é chamada fase ácida e o período de tempo aproximado para sua realização é dois meses. A temperatura média para essa fase percorre valores que vão de 29°C a 45°C. A característica fundamental da fase ácida é a tendência de diminuição do pH, variando entre 5,2 e 6,8.

O metabolismo das bactérias metanogênicas degrada os ácidos e as substâncias criadas na fase anterior e estabelece uma nova fase da biodigestão anaeróbia: a fase metânica instável. Essa fase é muito importante no processo de decomposição, pois nela se estabelece uma interação crítica entre as bactérias acetogênicas e as bactérias metanogênicas. Diversos fatores podem inibir ou acelerar este processo. Na fase existe a tendência do pH subir entre 6,8 e 7,2 e a temperatura se estabelecer em torno de 30°C. O tempo médio proposto por Tabasaran (1975) para essa fase é de dois anos.

A fase metânica estável ocorre quando as bactérias metanogênicas têm predominância no meio e os agentes inibidores ou aceleradores foram controlados. O pH estabiliza-se entre 7,0 e 7,2 e a temperatura normalmente é inferior a 30°C. Nessa fase estabelece-se a geração de gás metano e dióxido de carbono em grande quantidade, inclusive com a geração de lixiviado.

As tentativas de aproximar os modelos teóricos da realidade da biodegradação dos RSD nos aterros se intensificaram nas décadas de 1980 e 1990. Os motivos se relacionam com o despertar para a participação ativa dos gases de aterro no efeito estufa. Um dos estudos mais aceitos apresentado na década de 1990 sugeriu cinco fases na biodecomposição dos RSD: Ajuste Inicial (fase I), Transição (fase II), Ácida (fase III), Metanogênica (fase IV) e Maturação (fase V) (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993). A figura 2.3 mostra as diversas fases da biodegradação em aterros segundo Tchobanoglous *et al* (1993).

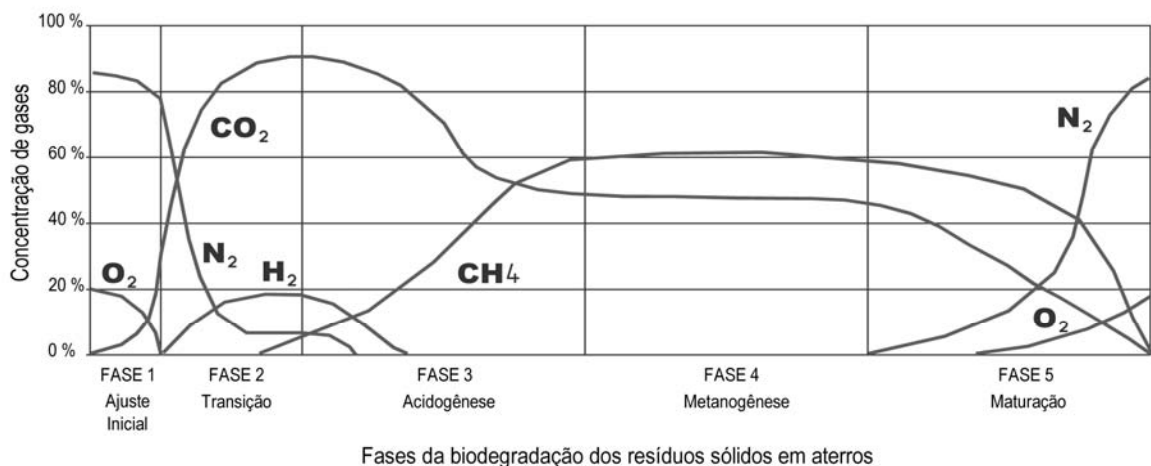


Figura 2.3: Dinâmica da geração dos principais gases componentes do biogás em aterros de resíduos sólidos segundo Tchobanoglous

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al* (1993)

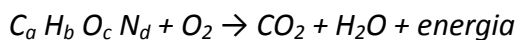
O período de duração das fases de biodegradação dos RSD pode sofrer alterações intensas, provenientes das diversas variáveis envolvidas no processo. O quadro 2.1 sugere o intervalo de tempo para cada fase da biodegradação que ocorre em aterros.

Quadro 2.1: Período médio de duração das fases de biodegradação dos RSD

FASES	CONDIÇÃO	PERÍODO TÍPICO
I	AERÓBICA	ALGUMAS HORAS A 1 SEMANA
II	ANÓXICA	1 A 6 MESES
III	ANAERÓBICA, METANOGENÉTICA INSTÁVEL	3 MESES A 3 ANOS
IV	ANAERÓBICA, METANOGENÉTICA ESTÁVEL	8 A 40 ANOS
V	ANAERÓBICA, METANOGENÉTICA DECLINANTE	1 ANO A MAIS DE 40 ANOS

Fonte: BANCO MUNDIAL (2003), citando vários autores

Ajuste Inicial (fase I): é a fase em que os RSD começam a ser decompostos, com presença predominante de bactérias aeróbias pela exposição da massa de lixo ao ar e conseqüente existência de oxigênio em quantidade atmosférica (21%). Os micro-organismos atuantes na fase provêm do solo onde o lixo é depositado e do solo utilizado como camada de cobertura da massa de lixo. O tempo de duração da fase é de alguns dias ou poucas semanas, pois após a cobertura da massa de lixo a quantidade de oxigênio começa a diminuir rapidamente pelo consumo exacerbado por parte das bactérias aeróbias. Na fase I inicia-se a produção de dióxido de carbono a partir da seguinte equação:



Transição (fase II): nesta fase os níveis de gases atmosféricos, como o nitrogênio e o oxigênio começam a cair bruscamente, iniciando-se a fase anaeróbia da biodecomposição. Não existe ainda a produção de metano, pela presença residual de oxigênio puro ou nas formas de nitratos e sulfatos disponíveis como aceptores de elétrons. No intervalo de tempo em que o potencial de óxido-redução permanece elevado na massa de lixo, os micro-organismos responsáveis pela produção de metano não atuam. A partir da queda do potencial, a matéria orgânica passa a ser convertida em ácidos orgânicos e outros produtos. O ácido acético e o propiônico são os mais importantes para a formação futura do metano. Na fase de transição intensifica-se a produção de gás carbônico, por ser gerado como um subproduto da fermentação da matéria orgânica.

Ácida (fase III): na fase ácida intensifica-se a formação de ácidos orgânicos e sua conversão em compostos intermediários, como o ácido acético (CH₃COOH), que serão grandes

geradores de metano. Inicia-se a formação de metano, mas ainda em quantidades mínimas. No entanto, o dióxido de carbono atinge seu pico de produção, proveniente da quebra de compostos orgânicos simples. O gás hidrogênio se apresenta em maior quantidade no início da fase III, mas tende a decrescer com o incremento da produção de metano. O pH do meio tende a decrescer a valores próximos de 5,0.

Metanogênica (fase IV): a fase metanogênica é também chamada de fase metanogênica estável, pela estabilização da produção de metano. Nessa fase diminui consideravelmente a presença de bactérias aeróbias ou facultativas e predominam os microorganismos estritamente anaeróbios, chamados bactérias metanogênicas. A produção de dióxido de carbono decai até se estabilizar em valores entre 35% a 50% do gás gerado no aterro. A produção de gás metano tende a crescer no início da fase e se estabilizar na faixa de 45% a 60% da parcela do biogás gerado. A produção de ácidos orgânicos diminui e a produção de metano se origina tanto do acetato como da redução do próprio dióxido de carbono gerado anteriormente; por isso, sua quantidade tende a diminuir até atingir a estabilidade.

Maturação (fase V): com a diminuição dos nutrientes, cai a produção de metano e gás carbônico. Restaram na massa de lixo os substratos de difícil biodegradação, e a decomposição microbiológica torna-se lenta. A pressão interna da célula de lixo diminui, propiciando novamente o aparecimento de gases atmosféricos como o nitrogênio e o oxigênio.

2.4. Fatores que influenciam a produção de gases em aterros

A diversidade de fatores influentes na biodecomposição altera a característica qualitativa e quantitativa do biogás e do lixiviado. A relevância e as características dos fatores vinculados à produção dos subprodutos da biodegradação dos RSD nos aterros são apresentadas a seguir.

2.4.1. Composição física dos resíduos sólidos domésticos (RSD)

A classificação dos componentes dos RSD obtidos a partir da caracterização física comumente inclui os seguintes itens: matéria orgânica putrescível; plástico; papel e papelão; vidro; metal ferroso; metal não ferroso; pano; couro e borracha; madeira, entre outros. Em

algumas cidades pode haver componentes típicos que merecem classificação específica, como coco em regiões litorâneas. Outros produtos de difícil segregação têm especial importância por agirem como inibidores da ação dos micro-organismos, como solventes, sabões, detergentes, colas, lâmpadas, pilhas, baterias, entre outros.

Os diferentes fatores que dão origem à composição física dos resíduos sólidos podem ser assim relacionados: condições climáticas da região, legislação municipal específica, área de abrangência da coleta, hábitos locais, variabilidade econômica da região, sazonalidade, nível educacional, número de habitantes do local, poder aquisitivo da população local, método de segregação. Outros fatores podem ser verificados em regiões com vocação turística como número de hotéis existentes, utilização de parques e jardins de forma intensiva, produção específica de resíduos em pontos turísticos, alta temporada e baixa temporada, motivo da hospedagem, etc. (PESSIN *et al*, 2005).

O resultado da caracterização física feita a partir dos resíduos sólidos coletados é conceituado como composição gravimétrica. Sua importância reside no fato de que os resíduos depositados terão características particulares dependendo da região onde se localizam.

A caracterização física dos resíduos é realizada coletando amostras de resíduos com peso superior a 91 kg e máxima de 140 kg (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993). Esses valores são justificados pela experiência de diversos pesquisadores, com o argumento de que valores menores que o parâmetro inferior pode levar a grandes distorções na classificação dos resíduos. Por outro lado, valores maiores que o valor máximo estabelecido não resulta em diferenças significativas na classificação (FRÉSCA *et al*, 2008). O peso específico dos RSD comumente se posiciona na faixa de 150 kg/m^3 a 200 kg/m^3 .

Nos estudos referentes aos subprodutos oriundas da biodegradação dos RSD, a ênfase se orienta aos componentes biodegradáveis, principalmente à matéria orgânica a outros componentes como papel, papelão e resíduos de poda. No Brasil, verifica-se que essas frações têm valores significativamente maiores que em outros países. O quadro 2.2 mostra a composição física típica dos RSD de alguns países em comparação com algumas cidades brasileiras por volta do ano 2000. Os estudos mais recentes indicam tendência de queda na parcela de matéria orgânica para as diversas regiões do Brasil (Figueiredo, 2009).

Quadro 2.2: Composição dos RSD em alguns países e em cidades brasileiras por volta do ano 2000

País/Cidade	Matéria Orgânica (%)	Papel e Papelão (%)	Plástico (%)	Vidro (%)	Metal (%)	Outros (%)
Estados Unidos	29,0	35,6	7,3	8,4	8,9	10,8
Japão	22,2	31,1	15,5	13,8	6,4	10,6
Reino Unido	23,4	33,9	4,2	14,4	7,1	17,0
Itália	42,1	22,3	7,2	7,1	3,0	18,3
Brasil (São Paulo)	64,4	14,4	12,0	1,1	3,2	4,9
Brasil (Belo Horizonte)	64,4	13,5	6,5	2,2	2,7	10,7
Brasil (Salvador)	61,8	11,7	9,8	3,9	4,3	8,5
Brasil (Recife)	64,0	15,0	9,5	1,93	2,4	7,17

Fonte: MACIEL (2003), citando FARIAS (2000) e outros autores

A presença significativa do componente plástico filme na composição dos RSD, representado principalmente por sacolas plásticas, foi verificada em pesquisa realizada no aterro do município de Passo Fundo, objetivando a composição gravimétrica de resíduos sólidos já aterrados (MATEI *et al*, 2007). A quantidade excessiva desse componente tem influência na biodegradação dos outros componentes, pois segregam o material existente em seu interior do restante da massa de lixo e impedem a inoculação de micro-organismos. Desta forma, criam seu próprio meio de biodegradação em dissonância com a biodegradação geral do aterro.

As pesquisas na área ainda são incipientes, principalmente porque a dinâmica do desenvolvimento econômico do Brasil influencia diretamente a composição gravimétrica dos RSD. A maior parcela dos municípios no Brasil desconhece a composição física do lixo produzido na região.

2.4.2. Composição química dos RSD

A composição química dos componentes biodegradáveis dos RSD define qualitativamente e quantitativamente as características dos substratos gerados a partir da biodecomposição dos resíduos. Os carboidratos comumente encontrados nos RSD são a celulose, hemicelulose, pectina e amido, em porcentagens superiores a 50% da matéria orgânica. Proteínas e lipídios têm fração menor na matéria orgânica dos RSD, com porcentagens inferiores a 20%. Outros componentes como a lignina e mesmo alguns produtos inorgânicos envolvidos em restos alimentares completam a diferença percentual.

Com relação ao potencial de geração de gases de cada componente químico da matéria orgânica, alguns valores são apresentados no quadro 2.3.

Quadro 2.3: Componentes químicos da matéria orgânica e suas taxas de produção de metano

Componentes Químicos da Matéria Orgânica	Taxas de produção de metano (m ³ /kg seco da fração)
	EHRIG (1991)
Carboidratos	0,453
Proteínas	0,509
Lipídios	1,021

Fonte: MACIEL (2003)

Verifica-se que, apesar de os lipídios sempre se apresentarem em frações menores da parcela global de matéria orgânica, seu potencial de produção de metano pode ser considerado como o valor da soma dos potenciais de carboidratos e proteínas.

2.4.3. Umidade dos RSD

Juntamente com a composição física e química dos resíduos sólidos, a umidade é considerada um fator de grande relevância. A quantidade de água na massa de lixo é essencial para a homogeneização do meio em biodecomposição, servindo como substrato e meio de locomoção dos microrganismos.

A água representa cerca de 80% do peso das células. Sendo assim, a grande maioria das reações bioquímicas ocorre no meio fluido. Nesse meio são diluídos os nutrientes necessários ao metabolismo celular, além de ser o agente condutor de enzimas nas interações comensais dos micro-organismos da biodecomposição anaeróbica. A baixa concentração de umidade diminui a difusão de massa e a distribuição de microrganismos em todo substrato.

Estudos realizados sobre a influência da umidade na biodecomposição anaeróbica de resíduos sólidos em reatores de batelada, com umidades de 70% e 80% e alta concentração de sólidos, constataram melhor desempenho da biodigestão anaeróbica nos reatores com maior valor de umidade (LOPES *et al*, 2002). Os fatores detectados para o fato relacionam-se com a limitação no transporte de massa e a pouca penetração e distribuição de

microorganismos no substrato, ficando evidenciada a necessidade de quantidades maiores de água para eficiência do processo.

Porém, Juca *et al* (2005) constataram umidades no interior da massa de lixo do aterro da Muribeca/Pe variando entre 20% e 40%, sem comprometimento aparente da taxa de biodecomposição anaeróbica dos resíduos. O fato sugere a influência de outras condições de contorno atuando diretamente na biodecomposição, tais como temperatura, potencial hidrogeniônico (pH) e potencial de óxido-redução da massa de resíduos sólidos.

A umidade média detectada no componente matéria orgânica dos RSD comumente se estabelece em valores que podem se aproximar de 80%. Sua origem está relacionada à grande quantidade de água existente nas células dos produtos orgânicos. A alta taxa de umidade da matéria orgânica eleva a umidade de mistura dos componentes dos resíduos sólidos.

Os valores de umidade considerados mais adequados para biodecomposição dos RSD nos aterros se estabelecem em percentuais entre 40% e 60%. A saturação dos resíduos sólidos dentro do aterro pode ser alcançada em camadas mais profundas, influenciada pela pluviosidade da região e pela pressão exercida pelas camadas superiores. Com a saturação, surge certa quantidade de umidade livre que exerce pressão sobre as reações químicas e biológicas, acelerando-as.

2.4.4. Índices pluviométricos regionais

Os índices pluviométricos podem influenciar no processo de biodecomposição dos resíduos sólidos dependendo também de outros fatores, como a espessura e o tipo de solo de cobertura do aterro. Camadas de cobertura de espessura insuficiente, ou com solo excessivamente permeáveis, permitem o acesso de grande quantidade de água para dentro da massa de lixo, carreando oxigênio dissolvido para as camadas superficiais do aterro. Isso propicia uma inversão microbiológica das camadas de cobertura, passando a prevalecer a biodigestão aeróbia nessas camadas. Foram detectadas variações bruscas de temperatura pelo incremento de atividade dos microorganismos aeróbios em camadas superficiais, em função das atividades exotérmicas desses microorganismos (JUNQUEIRA, 2000).

Constatou-se no aterro da Muribeca/Pe por meio da medição de gases, a prevalência da condição aeróbia na decomposição dos resíduos sólidos em camadas que variavam entre 2 e 3 metros de profundidade. Somente a partir dessa profundidade, verificou-se uma ação determinante dos micro-organismos anaeróbios (JUCA *et al*, 2005).

No entanto, se a impermeabilização superior do aterro pela camada de superfície tiver um bom desempenho e a eficiência dos elementos de drenagem for confirmada, a influência do fator pluviosidade será minimizada (MARIANO, 2008).

2.4.5. Temperatura

A temperatura é um dos fatores de grande influência na anaerobiose, pois os microrganismos não possuem meio para controlar sua temperatura corporal e dependem da temperatura do meio. Existem três faixas de temperatura associadas ao crescimento microbiano:

- Faixa psicrófila: entre 0°C e 20°C;
- Faixa mesófila: entre 20°C e 45°C;
- Faixa termófila: entre 45°C e 70°C.

Os valores são parâmetros aproximados e supõem ainda picos de crescimento bacteriano máximo em pontos de temperatura ótima. Pequenas oscilações de temperatura em torno da temperatura ótima podem reduzir abruptamente as populações microbianas (CHERNICHARO, 2000).

A termodinâmica das reações bioquímicas também é afetada fortemente pela temperatura, alterando as taxas das reações químicas enzimáticas e a própria difusão na massa de resíduos. Comumente observa-se crescimento das taxas de reações com o aumento de temperatura até atingirem um máximo, a partir do qual começam a serem observadas quedas nas taxas.

As bactérias geradoras de gases atuam na faixa mesófila de temperatura, comumente em valores que variam de 30°C e 40°C. Temperaturas inferiores a 15°C sugerem pequena atividade de bactérias metanogênicas (MC BEAN *et al*, 1995 apud BORBA, 2006).

As bactérias metanogênicas aumentam de população até a temperatura de 44°C. Poucos graus acima e o crescimento é inibido, com a taxa de conversão biológica caindo bruscamente. A maximização da atividade biológica pressupõe uma estabilização da temperatura em parâmetros próximos da temperatura ótima (LIMA, 1995).

As pesquisas no aterro da Muribeca/Pe observaram que lixos com idade de 15 anos apresentavam-se com características da fase de maturação (fase V), tendo como principais parâmetros baixa temperatura e pequenas populações de micro-organismos anaeróbios. Nas mesmas pesquisas observaram-se, em outro furo de sondagem, temperaturas entre 40°C e 55°C e altas concentrações de metano e de dióxido de carbono, bem como grande quantidade de microrganismos anaeróbios, indicando que neste ponto os resíduos encontravam-se na fase metanogênica estável (JUCA *et al*, 1999).

2.4.6 Temperatura externa

A temperatura interna da massa de RSD é oriunda normalmente das reações bioquímicas no processo de biodecomposição anaeróbio. No entanto, elas podem sofrer também influência da temperatura da região onde se encontra o aterro.

A influência da temperatura externa relaciona-se com a amplitude de variação da temperatura da região. Regiões de clima tropical têm pequena variação de temperatura ao longo do ano e sua influência é sentida nas camadas mais superficiais do aterro. Em regiões de clima subtropical e temperado, onde se verificam maiores variações de temperatura ao longo do ano, inclusive com temperaturas negativas no inverno, a influência da temperatura pode ser significativa em profundidades maiores (MACIEL, 2003).

As diferenças de temperatura existentes entre o ambiente externo e o ambiente interno podem fornecer calor ou extrair calor da massa de resíduos. Comumente há perda de calor para o exterior, situação típica de invernos prolongados e a baixas temperaturas, tendem a inibir os processos de biodecomposição pela inibição da ação das bactérias mesofílicas. Tem-se assim uma situação de dormência nos processos de biodecomposição anaeróbios. Em regiões de clima tropical, onde a amplitude de variação da temperatura entre o exterior e o interior se mostra menor, essas condições tendem a ser amenizadas.

Juca *et al* (2005) observaram no aterro da Muribeca/Pe, onde prevalece a condição de clima tropical litorâneo, a influência da temperatura externa somente em camadas com até 2,5 metros de profundidade. É importante relatar que, neste ponto de sondagem, a camada de solo de cobertura apresentava espessura de 75 centímetros e grau de compactação desconhecido.

Pesquisas realizadas em camadas profundas de aterros, superiores a 15 metros, relataram que nessas profundidades a temperatura externa não exerce qualquer influência. (QUIAN *et al*, 2002 apud BORBA, 2006).

2.4.7. Potencial hidrogeniônico (pH)

Na bioquímica dos processos de decomposição o pH pode ter influência direta, alterando a estrutura proteica de enzimas e outros compostos, ou mesmo indireta, afetando o grau de toxicidade de alguns compostos e causando inibição do processo anaeróbio.

A influência do pH na decomposição dos resíduos sólidos está ligada à estirpe de bactérias atuante na ocasião, ou seja, à fase de biodecomposição da massa de lixo. As bactérias produtoras de ácido atingem alta taxa de crescimento em faixas de pH variando entre 5,0 e 6,0. Essas bactérias são tolerantes a grandes variações de pH, podendo atuar em valores de pH próximos a 4,5 (CHERNICHARO, 2000). Por outro lado, bactérias do tipo metanogênicas atingem maximização de população e de produção de metano em parâmetros de pH entre 6,5 e 7,6 (MONTEIRO, 2003).

As alterações de pH na biodecomposição dos resíduos sólidos definem a existência de fases de biodegradação conforme descritas anteriormente. Assim, como as estirpes de bactérias dependem dos substratos fornecidos por outra estirpe, o esgotamento de determinado nutriente para uma estirpe de bactéria fornece a máxima quantidade de nutrientes para a outra estirpe. A população desta estirpe tende a crescer, alterando as reações bioquímicas predominantes da mistura e conseqüentemente o pH da mistura.

De forma geral, o pH no processo de biodecomposição dos resíduos sólidos em aterros varia em suas diversas fases entre 6,0 e 8,0. Valores fora dessas faixas podem acarretar severa inibição na produção de metano.

Lima (1995) define as seguintes condições de contorno para o processo de digestão, em termos de pH:

- Fase aeróbia: pH (neutro/alcalino) acima de 7,0
- Fase acetogênica: pH na faixa de 5,2 a 6,5
- Fase metânica instável: pH na faixa de 6,8 a 7,2
- Fase metânica estável: pH na faixa de 7,0 a 7,2

Juca *et al* (1999) constataram nas pesquisas no aterro da Muribeca/Pe, valores de pH na faixa de 8,0 com grande população de microrganismos, altas taxas de geração de metano e dióxido de carbono, indicando que neste ponto a massa de resíduos apresentava características da fase metanogênica estável.

2.4.8. Potencial de óxido-redução

Um dos parâmetros utilizados para verificar a fase de biodecomposição da massa de resíduos é o potencial de óxido-redução, ou potencial redox (Eh). O potencial redox é entendido como a espontaneidade ou a tendência de uma espécie química de adquirir ou ceder elétrons, sendo chamadas reações de oxidação as de perda de elétrons e reações de redução as de ganho de elétrons.

Conceitualmente, as reações redox determinam a mobilidade química de muitos compostos biologicamente importantes, existentes na massa de resíduos. É um parâmetro de intensidade do potencial de reação global no sistema, utilizando como referência padrão um eletrodo de hidrogênio (VANCE, 1996).

Na fase aeróbia da biodecomposição o oxigênio atua como acceptor de elétrons dos componentes biodegradáveis dos RSD, causando a oxidação desses compostos. Conforme os elementos químicos perdem seus elétrons, tendem a se reduzir. Na fase aeróbia, os valores medidos do potencial redox indicam números positivos, enquanto que na fase anaeróbia os números comumente são negativos.

Em condições de ausência de oxigênio, a conversão da matéria orgânica utiliza aceptores de elétrons inorgânicos como o NO_3^- (redução de nitrato), SO_4^{2-} (redução de sulfato). Na dinâmica bioquímica dos processos de redução da massa de resíduos, observa-se que a

formação de metano ocorre na ausência de oxigênio dissolvido nas formas de nitrato ou sulfato (CHERNICHARO, 2000).

As características das fases da anaerobiose indicam uma estreita faixa de domínio do potencial redox. Lima (1995), estudando os processos geradores da metanização dos resíduos sólidos, observou os seguintes intervalos de valores para Eh:

- Fase aeróbia: potencial redox variando de +800 mV a – 100 mV.
- Fase acetogênica: potencial redox inferior a -100 mV.
- Fase metânica instável: potencial redox oscilando em torno de -330 mV.
- Fase metânica estável: potencial redox variando de -330 mV a -600 mV.

Juca *et al* (2000) observaram valores inferiores a esses na fase de decomposição denominada fase metanogênica estável (fase IV). Um furo de sondagem apresentou o potencial redox variando no intervalo de -150 mV a -300 mV. Pelo fato de a fase metanogênica estável ser a mais longa das fases de biodecomposição anaeróbia, em medições futuras poderiam se observar valores mais próximos aos valores indicados anteriormente.

2.4.9. Nutrientes químicos

O ambiente anaeróbio é particularmente dependente de fatores físicos e químicos, pela rigorosa interação existente entre bactérias fermentativas e metanogênicas. Os fatores podem influenciar o crescimento bacteriano e a eficiência do processo de biodecomposição. O desenvolvimento da população de micro-organismos necessita de alguns nutrientes como o carbono e o nitrogênio em quantidades elevadas.

Para que haja o retorno do carbono orgânico para a atmosfera, existem alguns elementos químicos primordiais para as reações químicas. Sua atuação no processo se estabelece principalmente na interação entre as duas fases fundamentais do processo anaeróbio que são a fase fermentativa e de produção de ácidos e a fase metanogênica. A presença de algum nutriente em quantidade insuficiente pode retardar o processo de síntese pelas bactérias fermentativas e gerar quantidades insuficientes de ácidos para a fase metanogênica.

Os nutrientes são comumente separados em macronutrientes e micronutrientes dependendo da necessidade quantitativa pelas bactérias. A quantidade está relacionada diretamente à composição química das células.

O quadro 2.4 mostra os elementos químicos das bactérias metanogênicas e os separa em macronutrientes e micronutrientes.

Quadro 2.4: Composição química das bactérias metanogênicas

Macronutrientes		Micronutrientes	
Elemento	Concentração (g/kg SST)	Elemento	Concentração (mg/kg SST)
Nitrogênio	65	Ferro	1.800
Fósforo	15	Níquel	100
Potássio	10	Cobalto	75
Enxofre	10	Molibidênio	60
Cálcio	4	Zinco	60
Magnésio	3	Manganês	20

Fonte: LETTINGA *et al* (1996) apud CHERNICHARO (2000)

O nitrogênio comumente utilizado na biodigestão anaeróbia está na forma de amônia ou na forma de nitrogênio orgânico liberado durante a biodegradação. Os nitritos e nitratos são pouco encontrados por terem sido reduzidos até a forma de nitrogênio gasoso.

O enxofre é utilizado pelas bactérias metanogênicas na forma de sulfeto, obtido pela redução do sulfato. Na existência de enxofre nos resíduos em biodecomposição, esses darão origem ao gás sulfídrico; mas quantidades excessivas podem ser tóxicas às bactérias metanogênicas.

2.4.10. Produtos tóxicos

A composição do lixo urbano é resultado do comportamento humano, com influência de muitas variáveis. Fazem parte desse comportamento a utilização de compostos como detergentes, óleos, metais, etc. que são tóxicos para a maioria dos microorganismos. Atualmente são propostos produtos biodegradáveis para melhorar o processo de conversão. No entanto, os produtos biodegradáveis também são tóxicos para grande parte das bactérias anaeróbias.

Os metais pesados como o cobre, cádmio, chumbo, níquel, zinco e cromo (presentes em grande quantidade no “e-lixo”) são classificados como altamente tóxicos para os microorganismos. Comumente os produtos se apresentam na forma de sais e podem influenciar a presença de hidrogênio livre na massa de resíduos, alterando o pH da mistura. Muitos desses sais são insolúveis e aparecem no outro subproduto da decomposição anaeróbia que não os gases: o lixiviado.

2.5. Composição do biogás produzido em aterros

A composição do biogás resultante da biodegradação anaeróbia dos resíduos sólidos em aterros depende da composição química dos resíduos depositados e do universo de fatores influentes citados no escopo do capítulo. A parcela de participação na composição pode sofrer variação, dependendo inclusive da fase da biodecomposição ou, diretamente, da idade dos RSD depositados no aterro.

Tchobanoglous *et al* (1993) apresentam uma composição típica para o biogás gerado em aterros conforme o quadro 2.5. A composição resultou da análise realizada em 66 aterros da Califórnia, EUA.

Quadro 2.5: Composição típica do biogás gerado em aterros

Gás Gerado	Porcentagem (base seca)
Metano	45% - 60%
Dióxido de Carbono	40% - 60%
Nitrogênio	2% - 5%
Oxigênio	0,1% - 1,0%
Enxofre, Mercaptanas	0 – 1,0%
Amônia	0,1% a 1,0%
Hidrogênio	0 – 0,2%
Monóxido de Carbono	0 – 0,2%
Gases em menor concentração	0,01% - 0,6%

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al* (1993)

Verifica-se que a composição típica do biogás tem como parcelas predominantes o gás metano (45% a 60%) e o dióxido de carbono (40% a 60%). Essas médias podem ser sofrer alterações dependendo de oscilações de clima e costumes da região, ou mesmo

dependendo da fase de decomposição dos resíduos em estudos. Real (2005) obteve porcentagens de gás metano variando entre 64% e 72% no aterro de Pacarambi/RJ, que podem ser consideradas elevadas. Pesquisas realizadas no aterro de Nova Iguaçu/RJ apresentaram valores de metano variando entre 44% e 76% (BORBA, 2006). No aterro da Muribeca/Pe, Juca *et al* (2001) apresentam valores diversos para os furos de sondagem realizados, variando de forma geral de 20% a 42% para valores de dióxido de carbono e de 30% a 58% para o gás metano.

As diferenças existentes entre as concentrações de gás metano e dióxido de carbono, principais gases gerados da biodecomposição dos resíduos sólidos, estão ligadas também às características dos gases conforme é mostrado no quadro 2.6. O dióxido de carbono tem como propriedade a grande solubilidade, ao contrário do gás metano. Assim, uma parcela considerável de gás carbônico permanece dissolvida na fração aquosa da massa de lixo (ENSINAS, 2003).

Quadro 2.6: Propriedades de alguns gases existentes no biogás de aterros

Gás	Concentração típica no biogás	Densidade (kg/m ³)	Potencial calorífico (kJ/m ³)	Limite de explosividade	Solubilidade em água (g/l)	Propriedades gerais
CH ₄	45%-60%	0,716	35.600	5%-15%	0,0645	Inodoro, incolor, não tóxico, asfixiante e inflamável
CO ₂	35%-60%	1,978	-	-	1,688	Inodoro, incolor, asfixiante
N ₂	0-10%	1,250	-	-	0,019	Inodoro, incolor
O ₂	0-4%	1,429	-	-	0,043	Inodoro, incolor
CO	<0,1%	1,250	12.640	12,5%-74%	0,028	Inodoro, incolor, tóxico, inflamável
H ₂	<0,1%	0,090	10.760	4%-74%	0,001	Inodoro, incolor, não tóxico, inflamável
H ₂ S	0-70ppm	1,539	-	4,3%-45,5%	3,846	Incolor, muito tóxico

Fonte: MACIEL (2003) citando GANDOLLA *et al* (1997).

A composição do biogás pode conter mais de 300 gases, alguns presentes em grande quantidade e outros em traços. Os gases encontrados em traços na composição do biogás geralmente não ultrapassam 1% da composição total. No rol desses gases encontram-se compostos orgânicos e inorgânicos, sendo que os primeiros geralmente são maioria. Tchobanoglous *et al* (1993) relacionaram alguns gases encontrados em suas pesquisas em aterros da Califórnia/EUA. O quadro 2.7 mostra alguns dos gases existentes em traços na composição do biogás.

Quadro 2.7: Alguns gases existentes em traços na composição do biogás de aterros

Composto	Concentração Máxima (ppbV)
Diclorometano	620.000
Tolueno	280.000
Acetona	240.000
Acetato de Vinila	240.000
Tetracloroetileno	180.000
Metil Etil Cetona	130.000
Etil Benzeno	87.500
Estirenos	87.000
Benzeno	39.000
Xilenos	38.000
1,1 – Dicloroetano	36.000
Tricloroetileno	32.000
Cloreto de Vinila	32.000
Cloreto de Dietileno	20.000
1,1,2,2 – Tetracloroetano	16.000
1,1,1 – Tricloroetano	14.500
Clorofórmio	12.000
1,1 – Dicloroetano	4.000
Dicloreto de Etileno	2.100
Clorobenzeno	1.640
Trans – 1,2 - Dicloroetano	850

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al* (1993)

CAPITULO III – MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. O aterro controlado de Londrina

O município de Londrina está localizado 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.

Londrina se localiza entre as coordenadas 23°08'47" e 23°55'46" de latitude sul e entre 50°52'23" e 51°19'11" a oeste de Greenwich (LONDRINA, 2002). Em termos de área, ocupa 1% da área total do estado do Paraná e se posiciona na altitude de 610 metros, medida na área central da cidade. A zona urbana do município possui 118.504 km². Além da sede do município, Londrina é constituída pelos distritos de Paiquerê, Irerê, Lerroville, Warta, São Luiz, Espírito Santo e Maravilha.

A figura 3.1 ilustra a localização do município de Londrina.



Figura 3.1: Localização do município de Londrina

Fonte: AUDIBERT (2008)

As características climatológicas de Londrina foram fornecidas pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR, 2010). A Estação Meteorológica do IAPAR de Londrina publicou, para o município, o banco de dados mostrado no quadro 3.1.

Quadro 3.1: Dados climatológicos de Londrina

EST.: Londrina / CÓD.: 02351003 / LAT.: 23°22' S / LONG.: 51°10' W / ALT.: 585m													PERÍODO: 1976 - 2009			
MÊS	TEMPERATURA DO AR (°C)							U.REL	VENTO		PRECIPITAÇÃO (mm)			EVAPORAÇÃO	INSOLAÇÃO	
	média	média máxima	média mínima	máxima absol.	ano	mínima absol.	ano	média (%)	direção pred.	veloc. (m/s)	total	máxima 24h	ano	dias de chuva	total (mm)	total (horas)
JAN	23,9	29,5	19,6	36,4	1993	11,0	1980	76	E	2,4	212,1	113,5	1993	15	105,6	203,2
FEV	23,8	29,7	19,5	36,0	2005	12,2	1987	76	E	2,2	188,8	93,6	1993	14	91,1	192,8
MAR	23,5	29,7	18,7	37,0	2005	7,0	1987	73	E	2,2	136,2	124,6	1992	11	113,5	223,6
ABR	21,6	28,0	16,6	34,3	2002	3,8	1999	71	E	2,2	109,5	151,2	1984	8	108,6	227,8
MAI	18,3	24,5	13,5	32,0	2001	0,0	1979	74	E	2,1	115,8	84,0	1994	8	91,8	216,1
JUN	16,9	23,1	11,9	30,3	2002	-1,0	1994	75	NE/E	2,0	89,1	161,0	1997	8	80,8	206,4
JUL	16,9	23,5	11,8	31,2	1977	-1,3	2000	69	E	2,3	69,0	77,8	1990	6	105,1	229,2
AGO	18,8	25,8	12,8	34,8	1994	0,6	1984	62	E	2,4	53,8	62,5	1986	6	143,3	237,1
SET	19,9	26,4	14,5	37,5	1988	1,9	2002	64	E	2,8	122,7	82,8	1998	9	145,2	198,3
OUT	22,2	28,7	16,7	37,0	2007	8,0	1981	66	E	2,8	138,4	106,4	1994	10	155,6	219,7
NOV	23,2	29,4	17,9	39,2	1985	9,8	1976	67	E	2,8	164,6	142,7	1992	11	148,6	228,0
DEZ	23,7	29,4	19,0	36,4	1985	12,0	2001	72	E	2,6	205,9	117,1	1989	14	125,5	218,0
ANO	21,1	27,3	16,0					70,6			1606			121	1415	2600

Fonte: IAPAR (2010)

A média de precipitações no município durante o ano indica chuvas mais intensas nos meses de verão. Os meses de dezembro e janeiro apresentam maiores médias pluviométricas, normalmente acima de 200 mm. Os meses de julho e agosto registram os menores índices pluviométricos, variando aproximadamente entre os parâmetros de 50 a 70 mm. A soma das precipitações indica média anual de 1.606 mm. A figura 3.2 mostra a precipitação típica e o número de dias com chuva no município de Londrina.

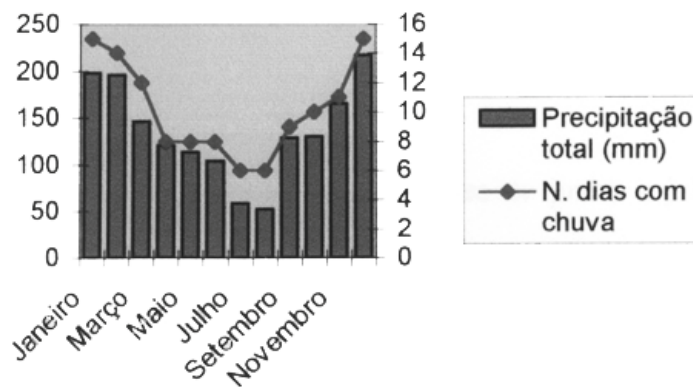


Figura 3.2.: Esquema típico de precipitação e número de dias com chuva em Londrina

Fonte: SURIAN (2002)

A temperatura no município de Londrina tem seus menores valores nos meses de junho e julho, mas acima de 16°C em média. A temperatura máxima é alcançada nos meses de dezembro e janeiro, com valores superiores a 23°C. Verifica-se que a temperatura média nos meses de novembro a março apresenta valores próximos aos índices máximos observados.

O aterro controlado de Londrina iniciou oficialmente suas atividades no ano de 1979. Localiza-se na Gleba Cambé, às margens da Estrada Achilles Pimpão Ferreira, conhecida popularmente como Estrada do Limoeiro, na altura do Km 3. Geograficamente, trata-se de um terreno de fundo de vale localizado na microbacia do córrego dos Periquitos.

Até o ano de 1998 ocupava uma área de 12 alqueires. Devido à falta de espaço disponível para depósito dos resíduos, a partir do ano de 1998 o terreno recebeu a adição de mais três alqueires, onde se situa atualmente a lagoa de chorume do aterro. A figura 3.3 apresenta a localização do aterro e algumas referências próximas.

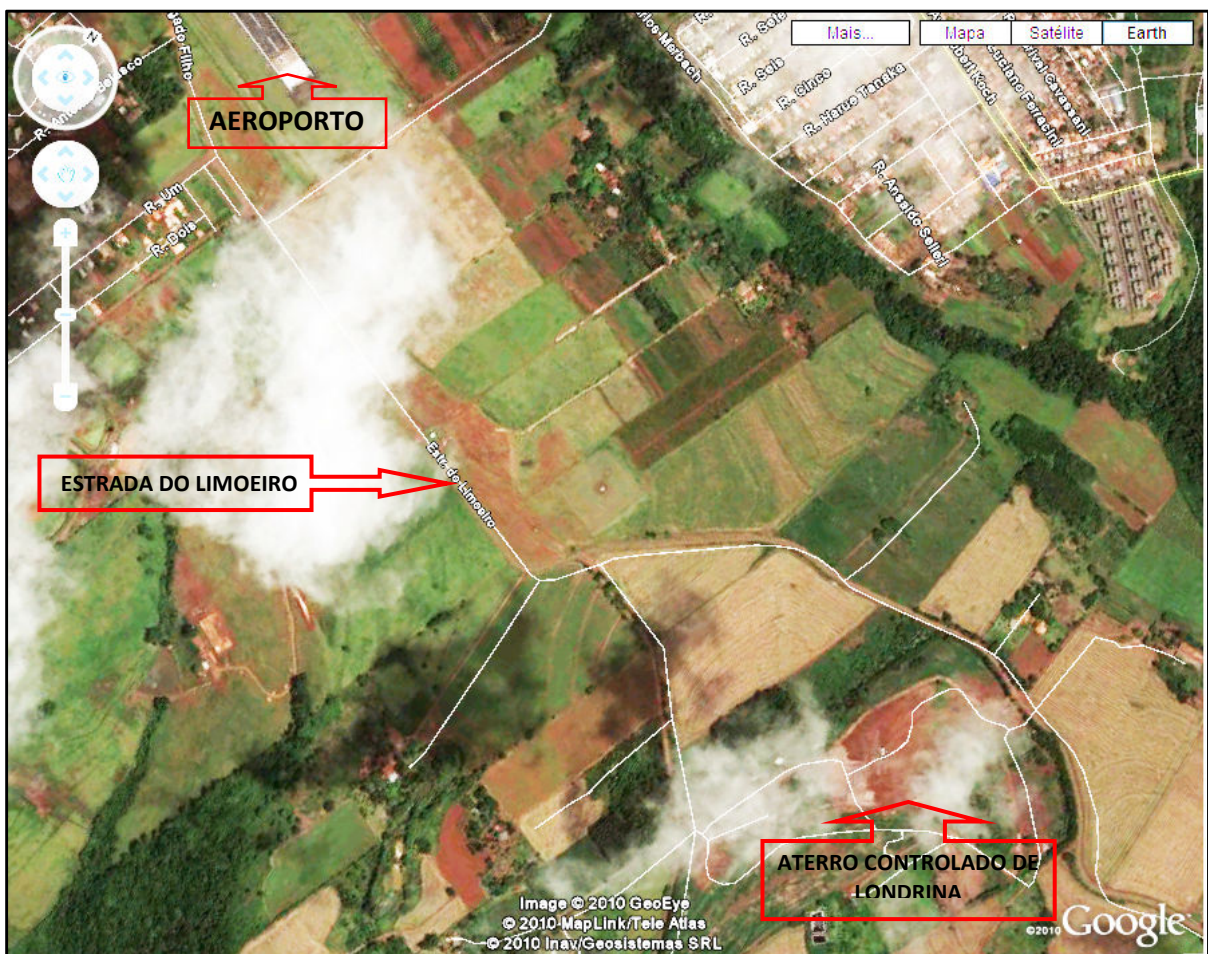


Figura 3.3: Vista superior e localização do aterro controlado de Londrina

Fonte: Software gratuito Google Earth

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. O depósito de lixo aconteceu inicialmente na área próxima à Estrada do Limoeiro. Com o decorrer dos anos, foi ocupando os espaços vazios do terreno em várias fases e em recamadas de altura variável, no sentido para o fundo do vale. A figura 3.4 mostra as curvas de nível do aterro e dos terrenos vizinhos e a seleção de áreas pela idade dos RSD depositados (ver item 3.3.1).

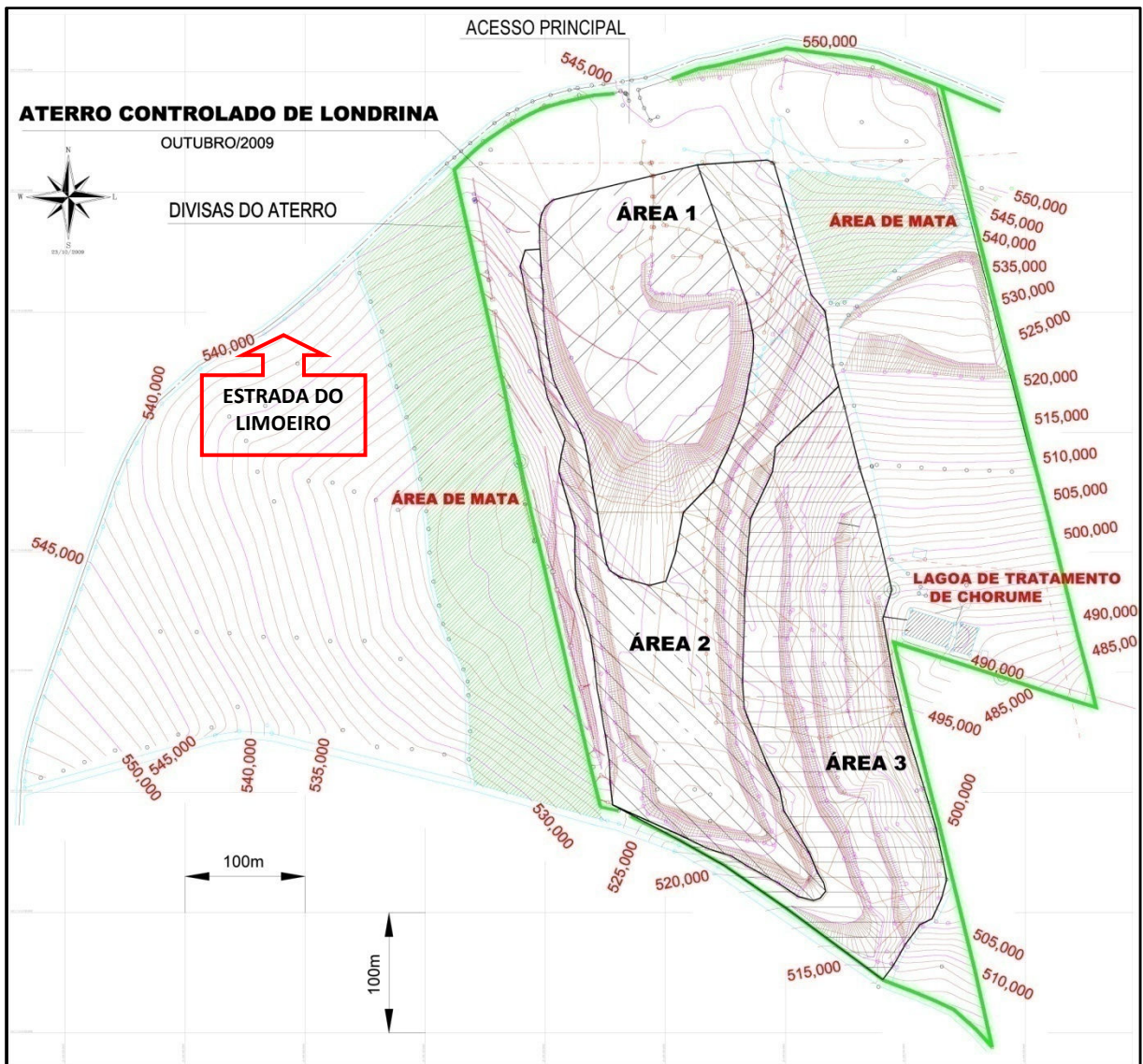


Figura 3.4: Levantamento planialtimétrico do aterro controlado de Londrina em outubro de 2009, com identificação de áreas de operação pela idade dos RSD depositados.

Fonte: Prefeitura Municipal de Londrina (2009)

Observa-se que a deposição dos resíduos cobriu o fundo de vale na região onde o terreno está inserido. Verifica-se também que, na parte norte do terreno do aterro, a deposição dos resíduos avançou aproximadamente em nível com a Estrada do Limoeiro em direção à região

Sul. O aterro está localizado entre duas faixas verdes, indicando áreas de mata. A região localizada a leste do terreno foi incorporada ao mesmo no ano de 1998 e tem aproximadamente três alqueires de área. Essa área recebia, no ano de 2010, resíduos de poda de árvores do município e em sua região posterior se localizam as lagoas de chorume.

O aterro de Londrina foi considerado até o encerramento de suas atividades em 2010 como um aterro controlado. No entanto, sua administração passou por diversas alterações durante os 32 anos de operação, levando o aterro a apresentar situação de “lixão” em algumas épocas. O motivo principal foi ausência de um planejamento único para operação e ocupação da área do aterro no intervalo de tempo em que esteve ativo.

3.2. Modelos matemáticos de previsão da produção de biogás

Como referido no capítulo II, o biogás é gerado a partir de processos físicos, químicos e microbiológicos, ocorridos na biodigestão dos resíduos orgânicos dos aterros. A diversidade de variáveis, bem como a interação entre as mesmas, pode ocasionar incertezas nas taxas de produção de biogás.

A produção de biogás pode variar de 0 m³ a 400 m³ por tonelada de resíduo (EL FADEL *et al*, 1997). O Banco Mundial admite produção de biogás entre 5 m³ a 300 m³ por tonelada de resíduo (BANCO MUNDIAL, 2003). A maximização da produção de biogás dependerá da quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, da característica da matéria orgânica predominante, do teor de umidade, da temperatura da massa de resíduos, do clima do local, da forma de operação do aterro entre outros.

Os modelos matemáticos mais utilizados para prever a produção de biogás em aterros tendem a simplificar a produção de biogás em função de poucas variáveis, englobando diversos fatores. A confiabilidade dos resultados estimados para a geração de biogás em aterros se fundamenta na precisão dos parâmetros de entrada dos modelos.

Os modelos de previsão são classificados de acordo com suas características, em função do tempo e de outras variáveis. Os modelos são rotulados comumente como:

- Modelos de ordem zero: a geração de biogás é constante ao longo do tempo.

- Modelos de primeira ordem: apresentam variabilidade de produção de biogás em função do tempo.
- Modelos de segunda ordem: incorporam diversas variáveis de procedência química e biológica para prever a produção de biogás em aterros, o que os torna significativamente complexos.
- Modelos multi-fase: observam as diversas fases de biodegradação dos resíduos sólidos, sua composição gravimétrica e química, analisando matematicamente o processo anaeróbio em etapas diferenciadas.

A eficiência dos modelos comumente segue a sequência inversa de como foram apresentados. Estudos realizados na Holanda observaram os erros relativos na aplicação de modelos teóricos. Nesses estudos verificou-se que todos os modelos apresentaram erros menores que 44%, atribuídos à variabilidade da composição física dos resíduos e à quantidade de resíduos depositados. Os modelos de ordem zero apresentaram erro de até 44%, os de primeira ordem apresentaram erros máximos de 22% e os multi-fase de 18% (OONK & BOON, (1995) apud ENSINAS, 2003).

A seguir são apresentados os modelos utilizados para estimar a produção de gases no aterro controlado de Londrina. Cumpre referir que existem modelos mais avançados sendo utilizados atualmente, inclusive levando em consideração grande número de variáveis aplicadas a softwares disponíveis. Optou-se por modelos que utilizam metodologia matemática relativamente simples, por não ser mote específico do trabalho analogias entre modelos teóricos.

3.2.1. Modelo de primeira ordem adotado pelo Banco Mundial

Trata-se de um modelo de primeira ordem aceito mundialmente por entidades ligadas ao estudo dos aterros e denominado modelo Scholl Canyon. O modelo adotado pelo Banco Mundial foi desenvolvido originalmente pela Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA). Sua simplicidade e facilidade de aplicação tenta romper a barreira historicamente existente entre o meio acadêmico e o meio empreendedor, principalmente no momento em que se objetiva a consciência mundial a respeito das alterações climáticas pelo efeito estufa.

O modelo Scholl Canyon é apresentado pelo Manual de Preparação de Gás de Aterro para Projetos de Energia na América Latina e Caribe (2003) do Banco Mundial. Proporciona a simplicidade típica dos modelos de primeira ordem e tem como parâmetros de entrada:

- A massa de resíduos depositada anualmente no aterro (m_i).
- O tempo de atividade ou de fechamento do aterro (t).
- O potencial de geração de metano (L_0).
- A taxa de geração de metano (k).

Preliminarmente, observa-se que o êxito do resultado se baseia em dois dados relativamente fáceis de serem obtidos (os dois primeiros) e em dados que aparentam ampla variabilidade (os dois últimos). O potencial de geração de metano (L_0) é função do grau de biodegradabilidade dos RSD depositados no aterro, ou seja, se baseia na composição dos resíduos depositados. As variáveis consideradas para estimar o potencial de geração de metano são o conteúdo de carbono do resíduo, a fração de carbono biodegradável e um fator de conversão estequiométrico. O quadro 3.2 apresenta os valores sugeridos pelo Banco Mundial para o potencial de geração de metano em função da biodegradabilidade do resíduo.

Quadro 3.2: Potencial de geração de metano em função da biodegradabilidade do resíduo

Valores de L_0 em função da biodegradabilidade do resíduo (m^3 metano/ton. resíduo)		
Categorização do Lixo	Valor mínimo para L_0	Valor máximo para L_0
Lixo relativamente inerte	5	25
Lixo moderadamente degradável	140	200
Lixo altamente degradável	225	300

Fonte: BANCO MUNDIAL (2003)

Observa-se que o potencial de geração de metano pode variar de 5 a 300 m^3 CH_4 /ton. de resíduo, conforme a categoria do lixo depositado no aterro. Altas taxas de biodegradabilidade sugerem altas taxas de matéria orgânica presentes, principalmente restos alimentares, papel, papelão e resíduos de poda.

O Banco Mundial sugere a utilização de um parâmetro médio de 170 m^3 CH_4 /ton. de resíduo para o potencial de geração de metano, classificando previamente a maioria dos resíduos

sólidos na faixa de lixo moderadamente degradável. No entanto, propõe que o usuário reflita sobre esse valor levando em consideração essencialmente a fração de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos.

A taxa de geração de metano incorpora variáveis como a umidade dos resíduos, pH, temperatura, e mesmo a disponibilidade de nutrientes capazes de acelerar o processo de biodigestão anaeróbia. Supõe assim, a velocidade da biodegradação dos RSD que acontece no aterro. Os valores propostos pelo Banco Mundial são função dos índices pluviométricos da região do aterro, conforme é mostrado no quadro 3.3.

Quadro 3.3: Taxa de geração de metano em função da precipitação

Valores da taxa de geração de metano (k) em função da precipitação anual da região			
Precipitação anual	Valores da taxa de geração de metano (k) em função do tipo de lixo		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
>250 mm e <500 mm	0,01	0,03	0,05
>500 mm e <1000 mm	0,02	0,05	0,08
>1000 mm	0,02	0,06	0,09

Fonte: BANCO MUNDIAL (2003)

A aplicação do modelo matemático denominado Scholl Canyon considera a produção de biogás no aterro a partir da quantidade de resíduos sólidos depositados no ano. A taxa de geração de metano e o potencial de geração de metano podem ser considerados constantes ao longo do ano.

A equação matemática proposta para representar o modelo é apresentada na equação 3.1.

$$Q_{CH4i} = k * L_0 * m_i * e^{-kt} \quad \text{(Equação 3.1)}$$

Onde:

Q_{CH4i} = quantidade de metano produzida no ano "i" do resíduo (m^3 /ano)

k = taxa de geração de metano (ano^{-1})

L_0 = potencial da geração de metano (m^3 de CH_4 /ton. resíduo)

m_i = massa de resíduo despejada no ano "i"

t = anos após o fechamento

O modelo ainda prevê outra aproximação para o cálculo do valor total de biogás gerado no aterro, considerando uma composição simplificada do gás como tendo 50% de metano e 50% de dióxido de carbono. Para aterros em funcionamento ($t=0$) o modelo passa a

apresentar geração constante de metano ao longo dos anos, o que não é apropriado. Por esse motivo e pela proximidade com o modelo USEPA (1998), o modelo do Banco Mundial não será utilizado diretamente para o aterro de Londrina, mas serão observados seus parâmetros e considerações.

3.2.2. Modelo de primeira ordem adotado pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA)

A USEPA (1998) apresenta dois modelos distintos de primeira ordem para tratar de emissões de gases gerados em aterros. O primeiro considera os aterros sem controle de emissão de gases para a atmosfera. Caso comum são os aterros controlados, lixões ou vazadouros onde a emissão de gases gerados pode acontecer em qualquer região do aterro e em quantidades variáveis. O segundo modelo considera que no aterro exista um sistema de captação de biogás, para posterior aproveitamento. A seguir é apresentado o primeiro caso (sem controle de emissão de gases), que é o caso mais comum dos aterros do Brasil.

O modelo para aterros sem controle de emissão de gases é apresentado em um documento da USEPA (1998) “Emission factor documentation for AP-42”, na seção que trata de aterros municipais de resíduos sólidos (“2.4 Municipal Solid Waste Landfills – MSW”). O documento admite que na maior parte dos aterros opera-se em três passos básicos: espalhamento dos resíduos sólidos, compactação dos mesmos e cobertura com o solo da região.

No complexo contexto de variáveis influentes na biodegradação anaeróbia, o modelo teórico cinético de primeira ordem adotado pela USEPA considera as seguintes variáveis para estimar a geração de biogás:

- A taxa média anual de resíduos sólidos recebidos durante a vida ativa do aterro (R).
- O tempo de atividade do aterro (t).
- O tempo de fechamento do aterro (c).
- O potencial de geração de metano (L_0).
- A taxa de geração de metano (k).

A taxa média anual de resíduos sólidos depositados no aterro (R) pode ser obtida junto às prefeituras dos municípios, quando as mesmas têm esses dados. A USEPA sugere outro meio

de se obter essa taxa, dividindo-se a capacidade do aterro pelo número de anos em funcionamento. No caso, outras variáveis precisam ser consideradas:

- Área do vazadouro (A).
- Altura do aterro (h).
- Densidade do lixo depositado (ρ).

O objetivo das duas primeiras variáveis apresentadas é obter o volume de resíduos sólidos depositados no aterro. Isto pode se tornar uma tarefa complexa, considerando como o aterro foi operado ao longo dos anos. Para a densidade do lixo depositado, a USEPA apresenta os valores do quadro 3.4, onde estima a densidade do lixo a partir do tipo de compactação.

Quadro 3.4: Valores estimados da densidade do lixo depositado no aterro

Tipo de compactação	Densidade (kg/m³)
Lixo compactado	635 - 831 (Média 742)
Lixo degradado compactado	1.009 – 1.127 (Média 1.068)
Sem dados	688

Fonte: USEPA (1.997) apud BORBA (2006)

O tempo de atividade do aterro (t) é um dado obtido junto às prefeituras. O tempo de fechamento do aterro é considerado no ano que o aterro encerrou suas atividades; caso contrário a variável é anulada para aplicação no modelo matemático.

O potencial de geração de metano (L_0) representa o gás metano produzido por certa quantidade de lixo estabelecida. A variável resume a influência da composição do resíduo, fundamentalmente da parcela de matéria orgânica. Os valores estimados consideram o conteúdo de carbono do resíduo e sua fração biodegradável, tal como no modelo anterior.

A taxa de geração de metano (k) é uma constante, que representa a taxa de decomposição biológica à qual o metano é gerado após o resíduo ser depositado. Pode ser influenciada por inúmeros fatores como disponibilidade de nutrientes, umidade do resíduo, pH da mistura e temperatura.

A umidade é o fator considerado como mais influente na taxa de geração de metano. A USEPA sugere os valores apresentados no quadro 3.5, dependendo dos índices pluviométricos da região.

Quadro 3.5 – Valores estimados de k e L_o em função da pluviosidade

Índice pluviométrico anual	>635 mm	<635 mm
k	0,04	0,02
L _o	100 m ³ /ton. resíduo	100 m ³ /ton. resíduo

Fonte: USEPA (1998)

Os valores sugeridos no quadro 3.5 são considerados baixos para os aterros, mas refletem resultados de pesquisas em 21 aterros diferentes nos Estados Unidos. A caracterização do biogás gerado nas pesquisas refletia comumente frações em volume de 55% de gás metano, 40% de dióxido de carbono e 5% de outros gases.

A equação matemática do modelo USEPA (1998) foi concebida com intuito de avaliar a geração de metano nos aterros. Pode-se supor, pela análise preliminar do modelo, que fração alguma do metano gerado é degradada nas camadas superficiais do lixo depositado ou mesmo na camada de cobertura. A simplificação não é conservadora, pois a oxidação do metano pode diminuir significativamente a emissão do gás metano pela superfície do aterro, o que estabelece uma distinção entre gás metano gerado (produzido) e gás metano emitido. A configuração matemática do modelo é apresentada na equação 3.2.

$$Q_{CH_4} = L_o \cdot R \cdot (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde:

Q_{CH_4} = quantidade de metano produzida por ano (m³/ano)

k = taxa de geração de metano (ano⁻¹)

L_o = potencial da geração de metano (m³ de CH₄/ton. resíduo)

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

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

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

e = base log, sem unidade.

Para estimar a produção de dióxido de carbono podem ser utilizados os dados percentuais em volume dos dois gases presentes no biogás gerado no aterro. A fórmula matemática sugerida é a equação 3.3.

$$Q_{CO_2} = Q_{CH_4} \cdot \left(\frac{\%Vol\ CO_2}{\%Vol\ CH_4} \right) \quad \text{(Equação 3.3)}$$

Onde:

Q_{CO_2} = quantidade de dióxido de carbono produzida por ano (m^3 /ano)

$\%Vol-CO_2$ = fração em volume de dióxido de carbono

$\%Vol-CH_4$ = fração em volume de gás metano

3.2.3. Software Landgem 3.02 (USEPA, 2005)

O software Landgem 3.02 (“Landfill Gas Emissions Model”) é um programa desenvolvido pela Agencia Ambiental Americana e utiliza como base o programa “Microsoft Excel”. O Landgem 3.02 tem fácil utilização e permite o calculo das emissões de gases em aterros por meio da introdução das variáveis utilizadas no modelo USEPA (1998). Para quantificar as emissões de gases produzidas a partir da biodegradação dos RSD, o programa emprega uma equação de decomposição de primeira ordem. O programa possibilita ainda calcular as emissões de metano, dióxido de carbono, NMOCs (“nonmethane organic compounds” - outros gases incluindo compostos orgânicos voláteis - VOCs) e outros poluentes atmosféricos.

O modelo matemático difere ligeiramente do modelo sugerido no documento “Emission factor documentation for AP-42” (USEPA, 1998). As diferenças são oriundas da revisão das equações existentes no documento citado, bem como da atualização de valores da concentração de gases (USEPA, 2005).

O cálculo da geração de gases em aterros pelo programa emprega a configuração matemática apresentada na equação 3.4.

$$Q_{CH_4} = \sum_{i=1}^n \sum_{j=0.1}^1 k \cdot L_o \cdot \left[\frac{M_i}{10} \right] \cdot (e^{-k \cdot t_{i,j}}) \quad \text{(Equação 3.4)}$$

Onde:

Q_{CH_4} = quantidade de metano produzida por ano (m^3 /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 (ano^{-1})

L_o = potencial da geração de metano (m^3 de CH_4 /ton. resíduo)

M_i = massa de resíduos sólidos recebidos no ano “i” (ton./ano)

t = idade da seção “j” dos resíduos M_i recebido no ano “i” (anos com decimal, p.e., 3.2 anos)

3.2.4. Modelo multi-fase sugerido por Tchobanoglous *et al* (1993)

Existem diferentes autores que apresentam metodologias multi-fase para aplicação em aterros. Lima (1995) apresenta um modelo de produção de biogás baseado na composição gravimétrica dos RSD, segundo o grau de biodegradabilidade de cada componente desses resíduos sólidos. Classifica os componentes dos RSD em quatro categorias: facilmente degradáveis (restos de alimentos, folhas, etc.), moderadamente degradáveis (papel e papelão e outros produtos celulósicos), dificilmente degradáveis (trapos, couro, borracha, etc.) e não degradáveis (pedra, terra, vidro, metal, etc.). Admite que a primeira categoria seria biodecomposta em quatro anos, a segunda em dez anos e a terceira em até cem anos. Para a produção de gás metano, importa fundamentalmente as duas primeiras categorias, com maximização de produção na meia vida de cada categoria, mostrando assim um comportamento fenomenológico com formato de triângulos isósceles.

A metodologia desenvolvida por Tchobanoglous *et al* (1993) tem por base a composição química dos componentes biodegradáveis dos RSD depositados nos aterros e avalia os gases gerados a partir de alguns parâmetros pré-estabelecidos. Cada componente dos RSD tem uma composição química característica em termos de carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e cinzas. A composição química proposta fundamenta a obtenção de uma fórmula genérica para os RSD depositados no aterro.

Tchobanoglous *et al* (1993) assumem que os resíduos sólidos biodegradáveis depositados em aterros podem ser classificados em três grupos: rapidamente biodegradáveis, lentamente biodegradáveis e inertes. De forma geral, resíduos rapidamente biodegradáveis são classificados como restos de alimentos, papel e papelão, grama e folhas; os resíduos lentamente biodegradáveis são madeira, tecidos, borracha e couro e os inertes são vidros, metais, etc.

Os produtos orgânicos biodegradáveis são compostos basicamente de carboidratos, proteínas e lipídios, nutrientes principais para a produção do biogás. Os plásticos, a borracha e a lignina da madeira (cerca de 30% de sua composição) são considerados por alguns autores como não degradáveis, por terem faixas de decaimento muito lentas.

No quadro 3.6 são apresentados os componentes com maior incidência na composição gravimétrica típica dos RSD, assim como sua classificação com relação à velocidade de biodegradação.

Quadro 3.6: Componentes dos RSD e sua faixa de biodegradação

MATERIA ORGÂNICA - COMPONENTES	RAPIDAMENTE BIODEGRADÁVEL	LENTAMENTE BIODEGRADÁVEL
Restos alimentares	X	
Jornais	X	
Papel de escritório	X	
Papelão	X	
Folhas e gramas	X	
Madeira		X
Resíduos têxteis		X
Couro		X
Borracha		X
Plásticos	-	-

Fonte: Adaptado de TCHOBANOGLOUS *et al* (1993)

Cada elemento classificado como rapidamente ou lentamente biodegradável tem uma composição química típica. A composição é apresentada em termos percentuais da participação do componente químico em questão. O quadro 3.7 apresenta a quantidade de cada elemento químico presente nos componentes dos RSD em termos de massa seca e separando os compostos orgânicos dos compostos inorgânicos.

Quadro 3.7: Porcentagem em massa dos elementos químicos nos componentes dos RSD

Componente	Porcentagem em massa (base seca)						Total
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinza	
Compostos orgânicos							
Restos de alimentos	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0	100,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0	100,0
Papelão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0	100,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0	100,0
Tecidos	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5	100,0
Borracha	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0	100,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0	100,0
Resíduos de jardim	47,8	6,0	38,0	3,4	0,3	4,5	100,0
Madeira	49,5	6,0	42,7	0,2	0,1	1,5	100,0
Compostos inorgânicos							
Vidro	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9	100,0
Metais	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5	100,0
Diversos	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0	100,0

Fonte: TCHOBANOGLOUS *et al*, (1993)

A metodologia é também conhecida por modelo triangular por adaptar o comportamento fenomenológico da biodegradação a formas geométricas de triângulos. Entretanto, os pontos de maximização e o tempo de biodegradação são diferentes dos propostos por Lima (1995). A figura 3.5 mostra o comportamento gráfico do fenômeno conforme a disposição proposta por Tchobanoglous *et al* (1993).

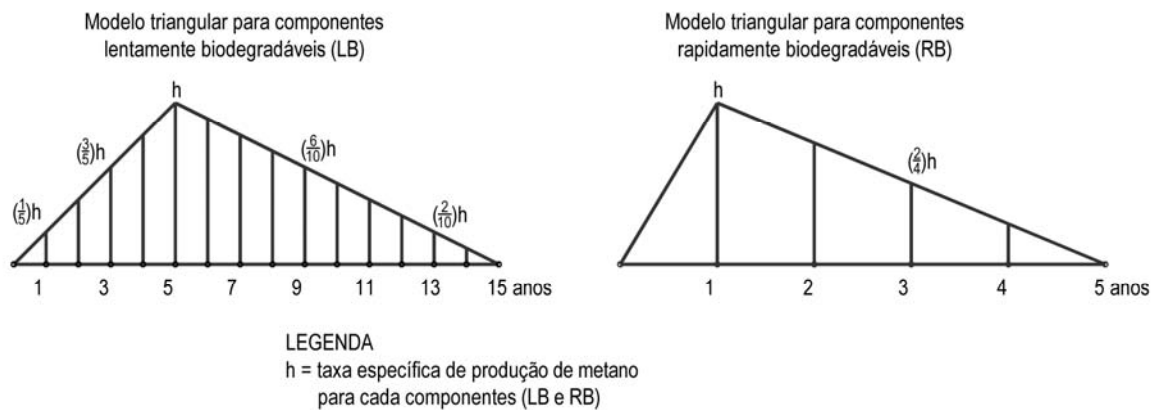
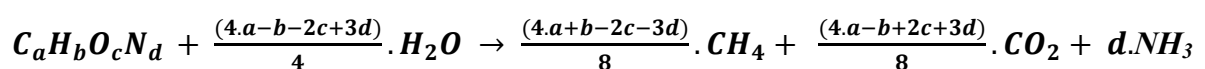


Figura 3.5: Modelo triangular proposto por Tchobanoglous *et al* para os componentes lentamente e rapidamente biodegradáveis dos RSD

Fonte: TCHOBANOGLIOUS *et al*, (1993)

Os componentes rapidamente biodegradáveis têm maximização de produção de gases no primeiro ano após a deposição dos RSD no aterro. O modelo admite que a partir do quinto ano da deposição dos RSD a produção de gases para esses componentes é extinta. No caso dos componentes lentamente biodegradáveis, a maximização da produção de gases acontece no quinto ano. Para essa espécie de resíduos o modelo considera que em quinze anos a produção de gases estará encerrada.

Para caracterizar os RSD, calculam-se quantitativamente os elementos químicos com parcela significativa na composição dos resíduos, utilizando-se a equação 3.5. Os coeficientes a , b , c e d são obtidos a partir da composição gravimétrica dos RSD, avaliando-se cada componente em termos de massa seca.



(Equação 3.5)

A fórmula representa a composição química dos compostos biodegradáveis presentes na composição gravimétrica dos RSD, considerando o peso seco desses resíduos. Conhecendo-

se os coeficientes a , b , c e d , podem-se calcular os coeficientes que equilibram a equação estequiométrica e os pesos moleculares dos fatores da equação química. De posse dos dados e, conhecendo-se os valores das massas específicas do gás metano e do dióxido de carbono, são calculados os volumes produzidos por unidade de massa seca da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, supondo conversão completa dos resíduos orgânicos em gás metano, dióxido de carbono e amônia.

Para o cálculo do volume unitário de gás metano por unidade de massa seca, utiliza-se a equação 3.6.

$$V_{CH_4} = M_S \cdot \frac{M_{CH_4}}{(M_{CaHbOcNd} \cdot \rho_{CH_4})} \quad \text{(Equação 3.6)}$$

Onde:

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

M_S = massa seca de resíduos (RB ou LB) (kg)

M_{CH_4} = massa de gás metano obtido na equação 3.5 (kg)

$M_{CaHbOcNd}$ = massa da matéria orgânica obtida na equação 3.5 (kg)

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

O volume unitário de dióxido de carbono por unidade de massa seca é calculado pela equação 3.7.

$$V_{CO_2} = M_S \cdot \frac{M_{CO_2}}{(M_{CaHbOcNd} \cdot \rho_{CO_2})} \quad \text{(Equação 3.7)}$$

Onde:

V_{CO_2} = volume unitário de dióxido de carbono (m^3/kg)

M_S = massa seca de resíduos (RB ou LB) (kg)

M_{CO_2} = massa de dióxido de carbono obtido na equação 3.5 (kg)

$M_{CaHbOcNd}$ = massa da matéria orgânica obtida na equação 3.5 (kg)

ρ_{CO_2} = massa específica do dióxido de carbono ($1,978 \text{ kg}/m^3$)

Os volumes encontrados representam as taxas unitárias teóricas de gás metano e dióxido de carbono geradas por unidade de peso seco da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos, nas suas frações rápida e lentamente biodegradáveis.

Para avaliação do comportamento dos resíduos sólidos a serem biodecompostos no aterro, considera-se que somente 75% dos resíduos rapidamente degradáveis estão disponíveis, principalmente pela presença de filmes plásticos como sacolas que acabam por segregar

parte desses resíduos do meio líquido necessário à biodegradação. No caso dos resíduos lentamente biodegradáveis, o valor sugerido como disponível para biodegradação é de 50% (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993). Considera-se ainda, como parâmetro básico, um rendimento metabólico médio de 25% para os RSD (RUSSO *et al*, 2005).

Para o cálculo final dos volumes de gases gerados anualmente no aterro, faz-se necessária a quantidade de resíduos depositados anualmente, bem como a umidade média dos resíduos. Sobre os valores são aplicados os coeficientes apresentados para o modelo, aplicados a idade e a classificação dos RSD mostrada nos triângulos característicos. O valor dos gases produzidos será a somatória dos gases produzidos no ano do inventário e nos anos anteriores conforme a idade dos RSD considerada no modelo triangular para os dois tipos de resíduos: rapidamente e lentamente biodegradáveis.

3.2.5. Modelo de primeira ordem adotado pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC)

O Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996) apresenta algumas metodologias para estimar as emissões de gás metano para a atmosfera. A metodologia simplificada, situada no contexto dos modelos de ordem zero, tem alguns parâmetros que são utilizados também na metodologia de primeira ordem. A seguir são apresentadas as variáveis dos dois modelos para melhor entendimento do modelo de primeira ordem, que é o modelo do IPCC escolhido para o estudo.

O método simplificado considera como variáveis iniciais o número de habitantes do local e a taxa de geração de resíduos sólidos produzidos por habitante. De forma geral, as variáveis envolvidas no cálculo são as seguintes:

- População urbana ou o número de habitantes de influência sobre os resíduos depositados no aterro (Pop.)
- Taxa de geração de resíduos sólidos gerados por habitante por ano (RSD/hab.ano)
- Fração de resíduos sólidos depositados no ano “i” ($RSD_F(i)$)
- Quantidade de metano aproveitada ou recuperada no ano (R)
- Fator de oxidação do metano na superfície do aterro (OX)
- Potencial de geração de metano dos resíduos sólidos depositados (L_0)

A população urbana do local, multiplicada pela taxa de resíduos sólidos gerados por habitante por ano fornecerá o total de resíduos sólidos gerados no ano (RSU_T). A fração dos resíduos sólidos efetivamente depositados no aterro, multiplicada pelo total de resíduos sólidos gerados pela população, resultará na quantidade em massa efetivamente depositada no aterro no ano “i”.

A quantidade de metano aproveitada ou recuperada é a quantidade de metano que foi captada para aproveitamento em algum sistema energético ou mesmo queima. Como a equação final do modelo calcula a quantidade de gás metano emitida para a atmosfera, a quantidade de gás metano aproveitada deve ser considerada.

O fator de oxidação é uma taxa percentual que representa a quantidade de gás metano que se oxida nas camadas mais superficiais e na camada de cobertura do aterro. Os estudos ainda são incipientes para o fator, mas é conhecido que as camadas superficiais e de cobertura do aterro tendem a oxidar certa quantidade de gás metano. O percentual comumente é maior do que em vazadouros sem camadas de cobertura. O fator tende a decrescer a quantidade de gás metano emitido para a atmosfera. Na falta de dados sobre o fator de oxidação, sugere-se que se adote valor nulo.

O potencial de geração de metano (L_0) tem modelo matemático próprio sugerido pelo IPCC (1996). O parâmetro é função de outras variáveis apresentadas a seguir:

- Fator de correção de metano (FCM)
- Carbono orgânico degradável (COD)
- Fração de carbono orgânico degradável dissociada (COD_f)
- Fração em volume de metano no biogás (F)
- Fator de conversão de carbono em metano (16/12)

O fator de correção de metano (FCM) reflete a qualidade do aterro, apresentando um parâmetro para os aterros conforme a qualidade de operação que se realiza no mesmo. Dependendo da forma como os resíduos são operados no aterro, podem produzir mais ou menos gás metano, tendo como fator preponderante a altura das camadas de lixo. Locais considerados adequados apresentam nivelamento do terreno, compactação mecânica do

lixo e camada de cobertura com espessura regular. O IPCC (1996) sugere os valores do quadro 3.8 para esse fator.

Quadro 3.8: Fator de correção de metano conforme as condições do aterro

Tipo de local	FCM – Fator de correção de metano
Adequado	1,0
Inadequado - profundo (> 5m de lixo)	0,8
Inadequado – raso (< 5m de lixo)	0,4
Locais sem classificação	0,6

Fonte: IPCC (1996)

O carbono orgânico degradável (COD) reflete a quantidade de carbono em fração acessível para ser degradável. Fundamenta-se na composição química da parcela biodegradável do lixo depositado e na quantidade de carbono existente em cada tipo de resíduo classificado. O IPCC sugere os teores de carbono orgânico para os diversos componentes do lixo conforme o quadro 3.9.

Quadro 3.9: Teor de carbono degradável para os principais componentes dos RSD

Componente	Porcentagem COD (em massa)
A) Papel, papelão e tecidos	40
B) Resíduos de parques e jardins	17
C) Restos de alimentos	15
D) Tecidos	40
E) Madeira (sem parcela de lignina)	30

Fonte: IPCC (1996)

Caso não existam valores para as frações dos componentes dos RSD do local, o IPCC sugere para o Brasil um parâmetro médio de 12% para o fator COD.

A fração de carbono orgânico degradável dissociada ou assimilada (COD_f) representa a fração orgânica de carbono que é disponível para degradação química, ou seja, corresponde ao COD que realmente se degrada. Considera que parte do carbono orgânico não se degrada e permanece na massa de resíduos sólidos por tempo indeterminado. A fração é função da temperatura existente na zona anaeróbia, mas comumente sugere-se o valor de 77%, considerando uma temperatura média de 35°C na zona.

A fração em volume de gás metano no biogás pode ser obtida através da caracterização média do biogás no aterro. No entanto, é comum se adotar o valor de 50% para essa fração, inclusive em outras metodologias. O fator de conversão é a fração da massa molecular do gás metano pela massa molecular do carbono.

A configuração matemática do modelo simplificado representa a emissão de gás metano considerando todas as variáveis apresentadas no item anterior. A emissão de gás metano será calculada pela equação 3.8.

$$E_{CH_4} = ((Pop \cdot Taxa \ RSD \cdot RSD_f \cdot L_o) - R) \cdot (1 - OX) \quad \text{(Equação 3.8)}$$

Onde:

E_{CH_4} = emissão de gás metano no ano (ton. de CH_4 /ano)

Pop = população urbana (número de habitantes)

$Taxa \ RSD$ = taxa de geração de resíduos sólidos por habitante (ton. RSD /hab.ano)

RSD_f = fração de RSD efetivamente depositados no aterro no ano (%)

L_o = potencial de geração de metano (ton. CH_4 /ton. resíduo)

R = quantidade de metano recuperada no ano em questão

OX = fator de oxidação (fração)

O valor do potencial de geração de metano será calculado em função das variáveis apresentadas na equação 3.9.

$$L_o = FCM \cdot COD \cdot COD_f \cdot F \cdot \left(\frac{16}{12}\right) \quad \text{(Equação 3.9)}$$

Onde:

L_o = potencial de geração de metano no ano (ton. de CH_4 /ton. de resíduo)

FCM = fator de correção de metano no ano em questão (quadro 3.8)

COD = fração do carbono orgânico degradável (ton. C /ton. resíduo => 12% na ausência de dados para o cálculo)

COD_f = fração do carbono orgânico degradável assimilada (%)

F = fração de metano no biogás (0,5 na ausência de dados)

$(16/12)$ = conversão de carbono a metano

O valor do teor de carbono orgânico degradável nos resíduos sólidos pode ser calculado a partir da equação 3.10, tendo como referência os valores do quadro 3.9.

$$COD = (0,4 \cdot A) + (0,17 \cdot B) + (0,15 \cdot C) + (0,40 \cdot D) + (0,3 \cdot E) \quad \text{(Equação 3.10)}$$

Onde:

A = fração de papel e papelão dos resíduos sólidos degradáveis

B = fração de resíduos de parques e jardins nos resíduos sólidos degradáveis

C = fração de restos de alimentos nos resíduos sólidos degradáveis

D = fração de tecidos nos resíduos sólidos degradáveis

E = fração de madeira nos resíduos sólidos degradáveis

A fração de carbono orgânico degradável assimilada (COD_f), apesar de ter um valor sugerido pelo IPCC como típico na ausência do dado, pode ser calculada em função da temperatura da zona anaeróbia do aterro pela equação 3.11.

$$COD_f = 0,014 \cdot T + 0,28 \quad \text{(Equação 3.11)}$$

Onde:

COD_f = fração do carbono orgânico degradável efetivamente assimilada

T = temperatura da zona anaeróbia em °C.

O modelo de primeira ordem sugerido pelo IPCC (1996) aproveita as variáveis do modelo de ordem zero, com acréscimo da constante “k” (taxa de geração de metano) e do tempo de funcionamento do aterro. O modelo leva em consideração um decaimento da quantidade de matéria orgânica disponível para ser degradada em função do tempo. Por isso, a constante de geração de metano é também chamada taxa de decaimento da quantidade de matéria orgânica dos resíduos sólidos depositados.

- Taxa de geração de metano (k)
- Tempo de funcionamento do aterro (t)
- Base logarítmica

O modelo matemático sugerido calcula a quantidade de gás metano gerado ao longo do tempo de funcionamento do aterro. Para tal, leva em consideração a somatória do gás metano gerado até o tempo firmado, conforme mostrado na equação 3.12.

$$CH_{4gerado} = \sum_{i=1}^t (A \cdot k \cdot RSD_T(x) \cdot RSD_f(x) \cdot L_0 \cdot e^{(-k \cdot (t-x))}) \quad \text{(Equação 3.12)}$$

Onde:

$CH_{4gerado}$ = geração de gás metano no ano (ton. de CH_4 /ano)

RSD_T = total de resíduos gerados pela população no ano “x” (ton. de resíduo/ano)

*RSD_T = População * Taxa de RSD por habitante (toneladas)*

RSD_f = fração de resíduos sólidos efetivamente depositada no aterro no ano “x” (%)

L_0 = potencial de geração de metano calculado pela equação 3.9 (ton. CH_4 /ton. resíduo)

$A = (1 - e^{-k})/k$; fator de normalização para corrigir a soma

k = taxa de geração de metano (ano⁻¹)

e = base logarítmica (sem unidade)

t = ano de realização do inventário

x = ano de contribuição desde o início das atividades do aterro até o ano “ t ”

O gás metano emitido será obtido subtraindo a quantidade de metano aproveitada em caso de recuperação, ou mesmo oxidada nas camadas superficiais e de cobertura do aterro. A emissão de gás metano é calculada pela equação 3.13.

$$CH_{4\text{emitido}} = ((CH_{4\text{gerado}}) - R(t)) \cdot (1 - OX) \quad \text{(Equação 3.13)}$$

Onde:

$CH_{4\text{emitido}}$ = gás metano emitido para a atmosfera no ano (ton. de CH_4 /ano)

$CH_{4\text{gerado}}$ = geração de gás metano no ano (ton. de CH_4 /ano)

$R(t)$ = quantidade de metano recuperada no ano em questão

OX = fator de oxidação (fração)

O IPCC apresenta a equação 3.14 para a constante de decaimento “ k ”, relacionando-a com o tempo necessário para o carbono orgânico degradável do lixo decair pela metade.

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}} \quad \text{(Equação 3.14)}$$

Onde:

k = constante de decaimento (ano⁻¹)

t = tempo para a fração do carbono orgânico degradável (COD) decair pela metade em massa (anos)

3.3. Medida das emissões de biogás

Medições de gases em aterros comumente apresentam grande variabilidade de resultados. A amplitude de variação se relaciona às diversas variáveis apresentadas no capítulo II, mas também existem outros fatores inconstantes envolvidos diretamente. Os gases procuram saídas facilitadas para fugirem para atmosfera. O gás metano, principalmente, devido à baixa solubilidade, não permanece na massa úmida e tende a vazar por caminhos que ofereçam maior facilidade.

Um dos objetivos do monitoramento dos gases no aterro é constatar a fase de biodegradação em que os RSD se encontram. A análise qualitativa e quantitativa das frações

de gases presentes no aterro contribui para a avaliação do processo de decomposição da matéria orgânica e sua fase atual (CATAPRETTA, 2008).

Os aterros comumente são operados em taludes e terraplenos devido ao acúmulo de lixo em determinado local. Pesquisas realizadas em célula experimental do aterro da Muribeca constataram que o fluxo superficial médio de gás metano foi mais elevado nos taludes que na cobertura superior do aterro. Os motivos apresentados foram o nível de compactação dos taludes, comumente inferior ao nível de compactação da camada de cobertura superior, bem como a predominância do fluxo horizontal do metano na camada de resíduos em relação ao fluxo vertical. Estudos indicam também que o material plástico presente no interior da massa de lixo favorece o fluxo horizontal (MACIEL, 2009).

Para avaliação preliminar da localização e intensidade dos gases que percolam através da camada de cobertura, Guedes (2007) propõe como metodologia inicial uma análise termal da camada de cobertura e imediatamente abaixo dela, por meio de furos e posterior inserção de termômetros. Esse procedimento possibilitaria uma verificação prévia dos pontos de maior fuga de gás metano, partindo-se do pressuposto que a produção de metano se realiza a partir de uma reação exotérmica. Em alguns casos, o gás metano pode apresentar temperaturas elevadas no interior do aterro, chegando a 65°C em profundidades próximas a 10 metros e a 30°C abaixo da camada superficial, como foi verificado no aterro da Muribeca/Pe (JUCA *et al*, 2005).

Pesquisas realizadas no aterro da Pescantina (Itália) mostraram que as emissões superficiais de gases apresentavam grande variabilidade quantitativa e qualitativa. Além das variações citadas, verificou-se variabilidade espacial de resultados na área de 7,2 ha do aterro. As conclusões apontaram inicialmente para a forma inadequada de operação do aterro e para a desigualdade na idade dos resíduos. Os gases apresentavam caracterização qualitativa próxima de 50% de gás metano e 50% de dióxido de carbono. Verificou-se também que fração pequena do gás metano degradava-se na própria camada de cobertura do aterro. Realizaram-se medições superficiais de emissão de gases com câmaras estáticas e dinâmicas e com termógrafo por infravermelho, sendo obtidos valores próximos a 0,5 NL/m².min (30 NL/m².h) para setores em operação e 1 NL/m².min (60NL/m².h) para setores mais antigos (COSSU *et al*, 1997). O autor constatou ainda que as câmaras estáticas (placa estática de

fluxo) foram as mais indicadas para medição de gases em camada de superfície por estarem aptas a captarem pequenas e grandes quantidades de gás que vazam. As câmaras dinâmicas (placa dinâmica de fluxo) apresentaram alterações na leitura dos gases, influenciada pela sucção que o ar provoca ao passar pela câmara, mostrando leituras de 2 a 6 vezes maiores que as placas estáticas de fluxo. As leituras com infravermelho se revelaram o método mais adequado para grandes áreas. No entanto, o termógrafo infravermelho necessita dados de temperatura e composição do gás para cada ponto, o que nem sempre está disponível.

As emissões de gases obtidos com placas estáticas de fluxo apresentam diversidade de resultados. Mariano (2008) mostra alguns resultados obtidos em pesquisas nos EUA, Alemanha, França, Ucrânia e UK, aqui reunidos no quadro 3.10.

Quadro 3.10: Resultados de ensaios de superfície em aterros diversos

Referência	Faixa de Emissão de CH ₄	Tipo de Ensaio	Local Idade	Espessura da Camada	Tipo de Camada	Faixa de Emissão em NL/h.m ²
Chanton <i>et al</i> , (2007)	13,8-26,0 g/m ² .dia	Placa	EUA	0,60 m	Geomembrana + argila + vegetação	0,8-1,52
Chanton <i>et al</i> , (2007)	17,7-35,4 g/m ² .dia	Laser	EUA	0,60 m	Geomembrana + argila + vegetação	1,03-2,06
Modrak <i>et al</i>	13,0 a 52,0 g/m ² .dia	Laser	EUA			0,75-3,03
Simon & Muller, (2004)	61,7 a 617 g/m ² .dia	Placa	Alemanha			3,6-35,98
Akerman <i>et al</i> , (2007)	0,004 a 10,2 g/m ² .dia	Placa	UK (0 a 40 anos)	1,00 m	Geomembrana + argila	0-0,59
Akerman <i>et al</i> , (2007)	0,004 a 0,43 g/m ² .dia	Placa	UK (4 a 24 anos)	1 a 2 m	argila + vegetação	0-0,03
Akerman <i>et al</i> , (2007)	10,7 g/m ² .dia	Placa	França (1 a 7 anos)	1 m argila e 0,30 m cinzas	cinzas + argila	0,62
Akerman <i>et al</i> , (2007)	16,8 g/m ² .dia	Placa	França (1 a 7 anos)	0,50 m a 0,70 m	argila	0,98
Akerman <i>et al</i> , (2007)	6,0 g/m ² .dia	Placa	França (1 a 38 anos)	0,50 m a 1,00 m	argila	0,35
Maciel, (2003)	103 a 363 g/m ² .dia	Placa	Brasil	0,25 m a 0,90 m	argila	6-21,16
Bogner, (2003)	78,29 g/m ² .dia	Placa			argila	4,56
Morcet <i>et al</i> , (2003)	56 a 287 g/m ² .dia	Placa			argila	3,26-16,7

Fonte: adaptado de MARIANO (2008)

Um fator decisivo a ser observado no trato de campo é a situação da superfície do aterro a ser pesquisado. Fatores como acesso facilitado a todos os setores de operação, situação da camada de cobertura e material utilizado para produzi-la, vegetação excessiva, etc., podem ter influência determinante na obtenção de dados.

Para verificar as emissões superficiais de gases faz-se necessário avaliar toda extensão do aterro. Um meio para execução do trabalho pode ser a subdivisão do aterro em áreas menores. Na Itália, Cossu *et al* (1997) subdividiu o aterro de 7,2 ha em quatro áreas distintas para suas pesquisas. Czepiel *et al*, (1996) sugere a subdivisão do aterro em segmentos de 60m x 60m para análise. Outro método para fracionar o aterro pode ser por semelhança da fase de biodegradação dos resíduos depositados, identificando a idade dos resíduos do aterro.

A utilização de placas estáticas de fluxo em medição de gases tem como fator básico na captura dos dados o tempo de realização do ensaio. O intervalo de tempo mínimo e máximo para constatação do fluxo superficial no ponto do ensaio de placa estática de fluxo pode variar de 15 minutos a 3 horas (ROLSTON, 1986 apud MACIEL, 2003). Alguns autores defendem que o período máximo para este ensaio não deve ultrapassar 60 minutos, devido ao aumento da pressão no ambiente interno da placa (BORJESSON *et al*, 1997).

As dificuldades encontradas em campo com a utilização de placas de tamanho e peso elevados levaram a simplificações. Maciel (2003) adaptou uma placa com dimensões de 0,40m x 0,40m x 0,05m para facilitação do ensaio, tanto com relação ao tempo necessário quanto ao deslocamento da placa no contexto das dificuldades de campo. Além das adaptações referidas, diminuiu também a dimensão de cravação no solo para apenas 0,03m, buscando facilitar essa operação com a placa em campo.

No Brasil, o aterro Bandeirantes/SP foi um projeto precursor na captação e aproveitamento energético do biogás. Os estudos realizados anteriormente à implantação do projeto monitoraram 30 poços de drenagem de gases, alguns com captação forçada e outros com captação espontânea. Os valores de gás metano nessa etapa ultrapassaram as expectativas, com porcentagens em volume acima de 60% e a viabilização e implantação do projeto em 2004 (KAIMOTO *et al*, 2008).

O aprimoramento das pesquisas realizadas no aterro Bandeirantes/SP verificou que poços com extração ativa de biogás produziram vazão de até cinco vezes o valor da vazão nos poços com extração passiva. No entanto, a porcentagem de gás metano no biogás diminuía quando a extração de biogás era realizada de forma ativa (SILVA *et al*, 2008).

3.3.1. Seleção de áreas para avaliar os gases nas campanhas de medidas do aterro controlado de Londrina

No aterro controlado de Londrina realizaram-se três campanhas de medidas. A primeira aconteceu nos dias 17 e 18 de outubro de 2009, com objetivo de avaliar qualitativa e quantitativamente os gases emitidos tanto pela superfície como pelos drenos verticais existentes no aterro. A segunda campanha aconteceu nos dias 4, 5, 6, 7 e 17 de setembro de 2010 com objetivos semelhantes aos da primeira campanha de ensaios. A terceira campanha de ensaios ocorreu nos dias 29, 30 e 31 de outubro e 01 e 02 de novembro de 2010.

As campanhas de medidas utilizaram metodologia semelhante para quantificação do gás emitido para a atmosfera. O aterro foi parcelado em três grandes áreas, com o intuito de classificar os RSD depositados nos últimos anos conforme o tempo transcorrido após a deposição.

De forma geral, as áreas foram selecionadas por uma identificação macro da idade dos RSD no aterro de Londrina. A área de operação mais recente do aterro, com resíduos sólidos depositados de idade até 2 anos no encerramento do aterro (novembro de 2010), recebeu o nome de área 1. A área com idade dos RSD entre 2 e 6 anos anteriores ao encerramento do aterro foi nomeada área 2. A região do aterro que apresentava sinais explícitos de operação antiga, com a presença de diversos taludes denotando camadas de lixo em níveis inferiores aos níveis das outras duas áreas foi nomeada área 3. A área 3 foi classificada como contendo RSD com idade superior a 6 anos tendo como referencia o encerramento do aterro (2010).

No intervalo de um ano entre a primeira campanha (2009) e a segunda campanha de medidas (2010) houve alterações na dimensão das áreas selecionadas em função das operações realizadas. Na segunda campanha de medidas a dimensão da área 1 aumentou e da área 2 diminuiu, devido ao avanço da deposição de RSD sobre a área 2. A área 3 permaneceu a mesma nesse intervalo de tempo.

A figura 3.6 mostra as três áreas nomeadas 1, 2 e 3, utilizando imagem de satélite do aterro controlado de Londrina fornecida pelo software “Google Earth”.

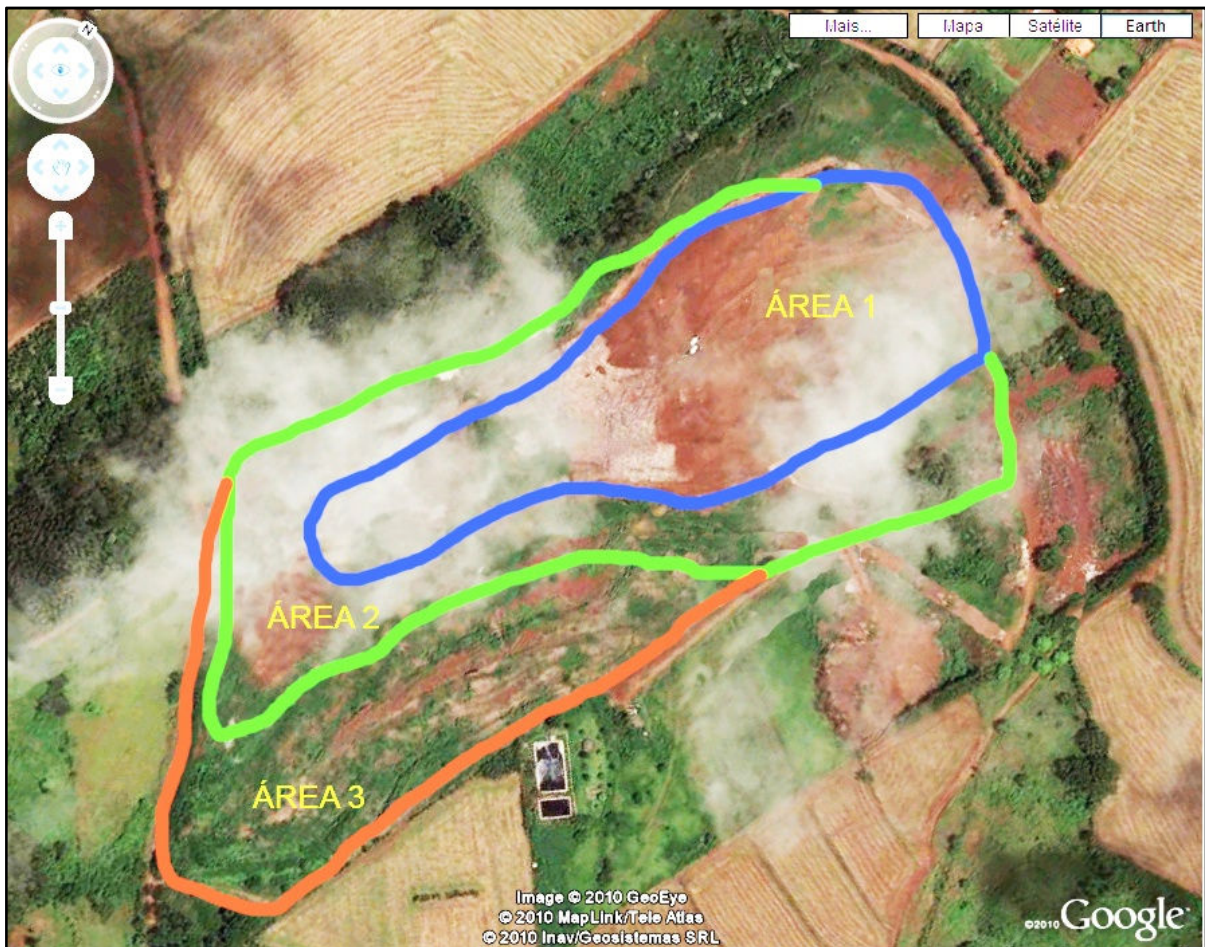
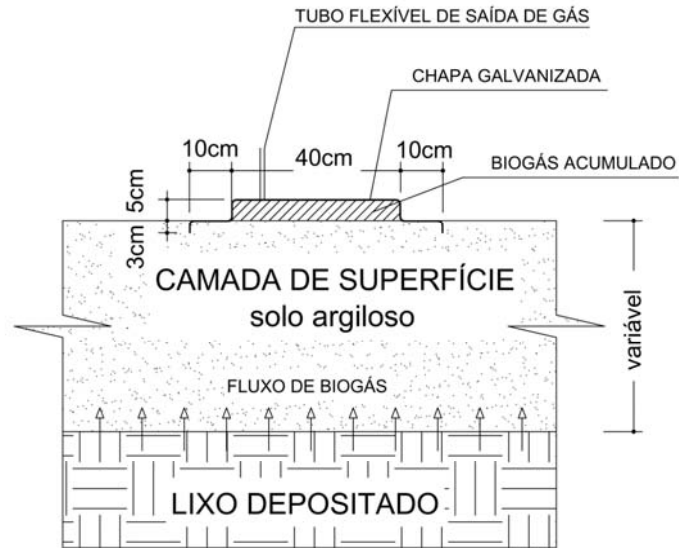


Figura 3.6: Vista do aterro controlado de Londrina onde se observam as áreas selecionadas conforme a idade dos RSD depositados.

Fonte: Software gratuito Google Earth

3.3.2. Métodos utilizados para avaliar os gases que são emitidos pela superfície do aterro

O monitoramento dos gases em fuga pela superfície do aterro foi realizado por meio de ensaios com placa estática de fluxo. As placas de fluxo do tipo estático são caracterizadas por acumular o biogás dentro de seu compartimento interno. Existe grande diversidade nos modelos de placa de fluxo utilizados para diversas situações e lugares, conforme se verifica na literatura. Para o aterro de Londrina foi utilizado um modelo de placa adaptado por Maciel (2003), cuja cravação no solo é de 3 cm. A figura 3.7 esquematiza a placa fixada sobre a camada de cobertura.



Esquema de captação de biogás
sobre a camada de superfície do aterro
com placa estática de fluxo

Figura 3.7: Corte esquemático da placa estática de fluxo utilizada para captação do biogás emitido pela camada de superfície do aterro de Londrina

Fonte: MACIEL (2003)

Após a escolha do local para cravação da placa, o terreno foi limpo e nivelado por meio de uma ferramenta manual (enxada), objetivando um perfeito assentamento e vedação da placa em relação ao solo. O perfil da cravação foi obtido colocando-se a placa sobre o solo e a escavação foi realizada nessa demarcação. Quando o solo da camada de cobertura não apresentava compactação elevada, era possível a cravação direta pisando sobre o batente lateral da placa. A figura 3.8 ilustra a placa de fluxo cravada sobre o solo.



Figura 3.8: Vista da placa de fluxo assentada sobre a camada de cobertura do aterro de Londrina na primeira campanha de medidas

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

Durante a cravação da placa as mangueiras permaneceram abertas para não haver acúmulo de gases antes do início do ensaio. Após a cravação da placa no solo, os equipamentos (detector de gases, termômetro e manômetro – ver especificações na pag. 65) foram acoplados para as medições de concentração volumétrica de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S e para leitura da temperatura interna da placa de fluxo.

As anotações foram realizadas em intervalos de tempo que variaram de 2 a 10 minutos (5 minutos em média). O tempo dos ensaios nas campanhas alcançou até 75 minutos. O tempo de cada ensaio foi o necessário para que as leituras da concentração de metano tendessem à estabilização.

Na primeira campanha de medidas foram realizados também ensaios de solo e de qualificação de gases sob a camada de cobertura. Nas outras duas campanhas esses ensaios não foram repetidos por limites das campanhas e por ser objetivo primário da pesquisa a avaliação quantitativa do biogás emitido pelo aterro controlado de Londrina.

Para análise de solo na primeira campanha, após a retirada da placa de fluxo fez-se também coleta do material no local de instalação da placa. Posteriormente ao ensaio de placa, cravou-se um anel de adensamento para obtenção da densidade do solo, retirado e embalado com papel alumínio. Repetiu-se o procedimento para determinação da umidade do solo e uma terceira amostra no mesmo local objetivou a determinação da porcentagem de finos do solo da camada de cobertura. No laboratório da Universidade Federal de Pernambuco determinaram-se o teor de umidade do solo de cobertura e o percentual de finos da amostra, após secagem em estufa a 105°C / 110°C e estabilização do peso da amostra. O peso úmido da amostra foi calculado no próprio aterro de Londrina. O teor de finos foi determinado após a secagem do material, verificando a porcentagem de material que passa na peneira 200 para averiguar o teor de finos do solo.

Para monitoramento de gases sob a camada de cobertura na primeira campanha de medidas foram realizados ensaios com tubos de inspeção. A concentração e a pressão dos gases no contato solo – resíduo foi monitorada por meio de tubos de PVC 100 mm, enterrados após abertura de furo circular por meio de trado manual e cavadeira articulada. Os tubos de PVC 100 mm estavam dotados de cap de vedação no extremo superior e adaptadores para mangueiras de silicone. Após o tubo de inspeção ser enterrado, vedaram-se as mangueiras

instaladas no cap para evitar a fuga do gás acumulado para o ambiente externo. Decorridos de 30 a 60 minutos foram feitas as leituras da pressão interna no tubo de inspeção e para a caracterização do biogás existente dentro do mesmo. A figura 3.9 ilustra a visualização do ensaio com o tubo de inspeção no aguardo das leituras de medidas.



Figura 3.9: Vista de ensaio com tubo de inspeção para monitoramento dos gases sob a camada de cobertura do aterro de Londrina

Fonte: MACIEL *et al.*, (2009)

3.3.3. Método utilizado para avaliar os gases emitidos pelos drenos verticais do aterro

Os gases que vazam nos drenos verticais foram monitorados por meio de medições de composição volumétrica, temperatura e vazão. A composição do biogás foi determinada com o mesmo aparelho utilizado nos outros ensaios, ou seja, o detector portátil Draeger X-am 7000. O equipamento possibilita o acoplamento de uma mangueira que pode ser inserida a partir do extremo superior do dreno. Analisaram-se gases do tipo CH_4 (0 a 100% com erro de + ou - 5%), CO_2 (0 a 100% com erro de + ou - 2%), H_2S (0 a 500ppm com erro de + ou - 1%) e O_2 (0 a 25% com erro de + ou - 1%). Além da composição dos gases que vazam pelos drenos, monitorou-se também a temperatura do biogás por meio de termômetro digital.

A figura 3.10 ilustra as medições realizadas nos drenos verticais.



Figura 3.10: Medições executadas em drenos verticais no aterro de Londrina
Fonte: MACIEL *et al* (2009)

A vazão do biogás na saída dos drenos foi verificada por meio de um termo-anemômetro colocado na parte interna do dreno. Foram realizadas leituras de velocidade do biogás em três posições do dreno, comumente no eixo e em dois pontos periféricos. A partir das leituras parciais de velocidade foi determinada a velocidade média do biogás na saída do dreno. Em posse da medida interna do tubo de aço do dreno vertical, determinou-se sua área e, posteriormente, a vazão do biogás.

3.3.4. Equipamentos utilizados para realização dos ensaios no aterro controlado de Londrina

Os equipamentos utilizados para a primeira campanha de medidas foram trazidos da Universidade Federal de Pernambuco e estão abaixo relacionados, com suas marcas, modelos e faixas de operação.

- Placa de fluxo quadrada com dimensões internas de 0,40m x 0,40m x 0,05 m (Maciel, 2003);
- Detector de gases (CH₄, CO₂, O₂ e H₂S) modelo X-am 7000 da marca Draeger,
- Termômetros digitais com sensor (faixa de medição de -50°C a 1300°C e com -199,9 a +199,9°C);
- Termo-anemômetro Unity modelo 208 (faixa de 0,2 a 20 m/s e resolução de 0,1 m/s e precisão de 3%);
- Manômetro digital Dwyer 477-2 (faixa de medição de 0-10 kPa, precisão 3 Pa);
- Tubo de PVC com cap de 100 mm;
- Anéis de adensamento (volume de 120 a 240 cm³);

- Cápsulas de umidade;
- Balança digital;
- Conexões diversas (mangueiras, engates, pinças, etc.);
- Ferramentas diversas (enxada, cavador, pá, faca, etc.).

Na segunda e terceira campanha de medidas os equipamentos foram fornecidos pela Universidade Estadual de Londrina, e são a seguir relacionados.

- Placa de fluxo quadrada com dimensões internas de 0,40m x 0,40m x 0,05 m e volume de 8,0 litros (adaptada de Maciel, 2003);
- Detector de gases (CH₄, CO₂, O₂ e H₂S) modelo X-am 7000 da marca Draeger;
- Termômetro digital com sensor Lutron modelo TM-902C (faixa de medição de -50°C a 1200°C e com -1°C a +1°C);
- Termo-anemômetro Airflow modelo TA35 (faixa de 0 a 20 m/s, resolução de 0,01 m/s e termômetro de 0 - 80°C);
- Aparelho GPS marca Garmim para marcação de coordenadas e altitude.
- Conexões diversas (mangueiras, engates, etc.);
- Ferramentas diversas (picareta, enxada, alicate, etc.).

3.3.5. Formulação utilizada para tratamento dos dados colhidos nos ensaios com placa de fluxo

Para tratamento dos dados colhidos em campo na segunda e terceira campanhas de medidas (na primeira campanha os valores foram coletados no relatório de resultados de Maciel *et al*, 2009), inicialmente foi realizada a correção da densidade do gás metano, conforme a temperatura registrada no ambiente interno da placa de fluxo. Para tal, utilizou-se a equação dos gases ideais (equação 3.15), também conhecida como equação de Clapeyron, comparando as condições de ensaio com as Condições Normais de Temperatura e Pressão (CNTP).

$$P \cdot V = n \cdot R \cdot T \quad \text{(Equação 3.15)}$$

Onde:

P = pressão absoluta (101,325 kPa na CNTP)

V = volume do gás (m³)

n = número de moles do gás ou massa do gás dividido pelo peso molecular do gás (m/M)

R = constante universal dos gases ideais (8,3145 m³.kPa/(kmol.K)

T = temperatura absoluta do gás (273,15 K)

O volume molar do gás na CNTP foi obtido pela aplicação da equação 3.15.

$$V/n = R \cdot T/P \quad \rightarrow \quad V/n = 8,3145 \cdot 273,15 / 101,325 = 22,414 \text{ m}^3/\text{kmol}$$

O volume molar do gás nas condições internas da placa foi alcançado pela aplicação da equação 3.16, conforme as condições locais do ensaio.

$$\frac{V}{n} = R \cdot \frac{(T + T_{int})}{P_{atm_{local}}} \quad \text{(Equação 3.16)}$$

A correção da densidade do gás metano e do dióxido de carbono foi obtida pela equação 3.17, a partir dos dados colhidos no ensaio.

$$\rho_{local} = \rho_{CNTP} \cdot \left(\frac{T}{(T + T_{int})} \right) \cdot \left(\frac{P_{atm_{local}}}{P_{atm_{CNTP}}} \right) \quad \text{(Equação 3.17)}$$

Onde:

ρ_{local} = densidade do gás no interior da placa (g/m^3)

ρ_{CNTP} = densidade do gás metano na CNTP ($\rho_{CH_4} = 716 \text{ g}/\text{m}^3$ ou $\rho_{CO_2} = 1978 \text{ g}/\text{m}^3$)

$P_{atm_{local}}$ = pressão atmosférica local

$P_{atm_{CNTP}}$ = pressão atmosférica (101,325 kPa na CNTP)

T = temperatura absoluta do gás (273,15 K)

T_{int} = temperatura do gás no interior da placa ($^{\circ}\text{C}$)

Com os resultados alcançados pela formulação citada, foi possível obter valores da emissão de gás metano e gás carbônico em termos de vazão mássica e vazão volumétrica. Devido à ausência de barômetro para medição da pressão atmosférica local, os valores foram coletados do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), localizado a cerca de 5.000 metros do aterro de Londrina. A diferença de altitude entre os dois locais é de 580m (IAPAR) para 530m (aterro) e foi compensada com acréscimo de 1 mmHg para cada 12 metros, conforme instrução dos técnicos do IAPAR.

O cálculo da densidade dos gases corrigida para o local do ensaio possibilitou avaliar a quantidade de gás metano e gás carbônico existente no ambiente interno da placa de fluxo. A vazão mássica, também chamada fluxo mássico, foi obtida pela equação 3.18.

$$\dot{m}_{CH_4} = \frac{m_{CH_4}}{(A_{placa} \cdot t)} \quad \text{(Equação 3.18)}$$

Onde:

\dot{m}_{CH_4} = vazão mássica de gás metano (g/s.m²)
 m_{CH_4} = massa de metano no interior da placa de fluxo (g)
 A_{placa} = área do ambiente interno da placa de fluxo (m²)
 t = tempo do ensaio (s)

A vazão volumétrica ou fluxo volumétrico foi calculado por meio da equação 3.19.

$$Q_{CH_4} = \frac{(3,6 \times 10^6) \cdot \dot{m}_{CH_4}}{\rho_{CH_4}} \quad \text{(Equação 3.19)}$$

Onde:

Q_{CH_4} = vazão volumétrica ou fluxo volumétrico de gás metano (NL /h.m²)
 \dot{m}_{CH_4} = vazão mássica de gás metano (g /s.m²)
 ρ_{CH_4} = densidade do gás metano (716 g/m³)

3.3.6. Formulação utilizada para tratamento dos dados colhidos nos ensaios realizados nos drenos verticais

Para tratamento dos dados colhidos nos ensaios realizados nos drenos verticais, a pressão atmosférica foi novamente fornecida pelo Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e corrigida para a altitude do aterro de Londrina, conforme procedimento realizado nos ensaios com placa de fluxo. Com as velocidades parciais colhidas no campo foi calculada a velocidade média de saída do biogás no extremo superior do dreno. A vazão do biogás no dreno vertical foi calculada pela equação 3.20.

$$Q_{biogás} = v_m \cdot A_d \cdot \left(\frac{T}{(T + T_{int})} \right) \cdot \left(\frac{Patm_{local}}{Patm_{CNTP}} \right) \quad \text{(Equação 3.20)}$$

Onde:

$Q_{BIOGÁS}$ = vazão volumétrica ou fluxo volumétrico do biogás (Nm³ /h)
 v_m = velocidade média do biogás obtida a partir das três velocidades medidas na seção transversal do dreno (m /s)
 A_d = Área da seção transversal do dreno (m²)
 $Patm_{local}$ = pressão atmosférica local
 $Patm_{CNTP}$ = pressão atmosférica na CNTP (101,325 kPa)
 T = temperatura absoluta do gás (273,15 K)
 T_{int} = temperatura do gás no interior do dreno (°C)

A equação 3.20 calcula a vazão normalizada de biogás que vaza pelo dreno. Para alcançar as vazões de gás metano e gás carbônico faz-se necessário aplicar a parcela em volume de cada gás, medida com o equipamento Draeger X-am 7000.

3.3.7. Tratamento estatístico dos resultados de emissão superficial de gases obtidos nos ensaios com placa de fluxo

A análise estatística dos resultados finais calculados para os ensaios com placa de fluxo objetivou avaliar o comportamento espacial das emissões de gases, considerando as coordenadas cartesianas de cada ensaio definidas a partir de um ponto no mapa do aterro de Londrina. Definiu-se o eixo das abscissas como sendo o rumo oeste para leste (positivo) e o eixo das ordenadas como sendo o rumo do sul para o norte.

De forma geral, os algoritmos de interpolação fornecem pesos aos pontos amostrados, diferindo na forma como calculam esses pesos. O melhor método é o que gera os resultados mais confiáveis e satisfatórios ao usuário.

Para escolha do método geoestatístico realizou-se uma avaliação prévia de métodos de interpolação. Landim (2000) sugere uma avaliação de alguns métodos conforme suas características, reconhecendo que todos os métodos estatísticos têm vantagens e desvantagens.

O quadro 3.11 exhibe uma avaliação prévia de alguns métodos conhecidos de interpolação.

Quadro 3.11: Comparação entre alguns métodos de interpolação

Algoritmo	Fidelidade aos dados originais	Suavidade das curvas	Velocidade de computação	Precisão geral
Triangulação	1	5	1	5
Inverso da distância	3	4	2	4
Superfície de Tendência	5	1	3	2
Mínima Curvatura	4	2	4	3
Krigagem	2	3	5	1
Códigos adotados: 1 = melhor situação / 5 = pior situação				

Fonte: LANDIM (2000)

A avaliação estatística dos dados obtidos nas três campanhas de medidas considerou as três áreas do aterro separadamente. Adotou-se, como critério de seleção do método de

interpolação, o que proporcionou maior aproximação à média aritmética original no contexto geral dos dados considerados, como forma de adoção de um único método para todas as áreas e todas as campanhas. O cálculo das médias foi realizado com a base de dados da respectiva área do aterro, considerando cada campanha de medidas. Foram avaliados os seguintes métodos de interpolação: krigagem, média móvel, inverso ponderado da distância, curvatura mínima, triangulação com interpolação linear, regressão polinomial, vizinhança natural e mais próxima e função de base radial.

Os métodos de interpolação por krigagem e inverso ponderado da distância apresentaram os melhores resultados. No entanto, devido à baixa densidade de dados em algumas áreas, os variogramas de interpolação por krigagem exibiram irregularidades. Adotou-se assim, como método de melhor resultado para a base de dados de todas as áreas, o método do inverso ponderado da distância com o expoente “2”, também chamado inverso do quadrado da distância (IQD).

O método IQD de interpolação apresenta como vantagens a simplicidade do algoritmo e a fidelidade aos valores amostrados originais. Também pode ser considerado um bom estimador para propósitos gerais em dados irregularmente distribuídos (LANDIM *et al*, 2002). A ferramenta utilizada para realizar a avaliação estatística foi o programa Surfer 8 (Golden Software, Inc.).

3.3.8. Método utilizado para quantificação de gases no aterro controlado de Londrina

Conforme apresentado anteriormente, parcelou-se o aterro de Londrina em três grandes áreas baseadas na idade dos RSD depositados. O método foi repetido para as três campanhas de medidas, com alterações nas dimensões das áreas somente entre a primeira e as outras duas campanhas de medidas. Entre a segunda e a terceira campanha de medidas não houve alteração nas dimensões das áreas.

A quantificação da emissão total do biogás no aterro controlado de Londrina para cada campanha de medidas teve por fundamento os seguintes pressupostos, apresentados de forma resumida:

- a) O aterro de Londrina foi parcelado em três grandes áreas, tendo por fundamento a identificação macro da idade dos RSD depositados nos últimos quinze anos.
- b) Os ensaios realizados na superfície do aterro com placas de fluxo foram classificados e tratados separadamente conforme a área em que estavam inseridos.
- c) Realizou-se o tratamento estatístico dos resultados obtidos nos ensaios com placa de fluxo com intuito de obter a média das emissões na área em questão.
- d) Os dados de emissão de gás metano e de gás carbônico foram tratados separadamente para quantificação do biogás emitido pela superfície do aterro.
- e) A emissão superficial dos gases em cada área foi alcançada multiplicando-se a média da emissão superficial dos gases pela dimensão da área em questão.
- f) A emissão superficial total de gases resultou da soma das emissões em cada área.
- g) Os resultados das emissões de gases obtidos a partir dos ensaios realizados nos drenos verticais foram somados para conquista das emissões por drenos na área em que estavam inseridos.
- h) A emissão total por drenos na campanha resultou da soma das emissões em cada área.
- i) Os resultados obtidos para emissão de biogás na campanha consideraram apenas os dados de emissão de gás metano e de gás carbônico, avaliando que outros gases têm participação secundária na quantificação estimada do biogás.
- j) A emissão total de biogás na campanha foi alcançada pela soma das emissões na superfície do aterro e nos drenos verticais do aterro.

Cumprе referir que a primeira campanha de medidas não apresentava objetivos específicos de quantificação do biogás total emitido pelo aterro de Londrina. A metodologia utilizada para quantificar os gases em fuga no aterro foi adaptada a partir dos resultados do relatório da campanha (MACIEL *et al*, 2009), com fins de constatar preliminarmente a validade do método adotado para as próximas campanhas. Para estimar o volume total de biogás emitido no aterro a partir da primeira campanha, o volume de gás carbônico foi considerado igual ao volume de gás metano emitido pelo aterro, pois não existiam dados específicos sobre as emissões de gás carbônico no relatório citado. Nas outras campanhas as emissões de gás carbônico foram calculadas repetindo o procedimento realizado para o gás metano.

3.3.9. Localização dos pontos de ensaios na primeira campanha de medidas

A primeira campanha foi realizada pelo Grupo de Resíduos Sólidos da Universidade Federal de Pernambuco, com o auxílio de engenheiros pesquisadores da Universidade Estadual de Londrina. O relatório de resultados tem o título “Avaliação Simplificada do Biogás no Aterro de Londrina/Pr” (MACIEL *et al*, 2009). A campanha consistiu na escolha de pontos distribuídos sobre a superfície do aterro de Londrina para realização de cinco ensaios com placa de fluxo e 10 ensaios com tubos de inspeção. Foram também avaliados os gases que eram emitidos pelos 12 drenos verticais existentes no aterro na ocasião da campanha.

Os pontos de ensaio com placa de fluxo foram nomeados EP-01, EP-02, EP-03, EP-04 e EP-05. Os pontos de ensaios com tubos de inspeção foram nomeados T-01 a T-10, sendo que os pontos T-01 a T-05 tiveram localização coincidente com os pontos de ensaios de placa de fluxo EP-01 a EP-05, respectivamente. Os drenos verticais existentes no aterro de Londrina foram nomeados DV-01 a DV-12.

Na figura 3.11 são apresentadas as áreas selecionadas para avaliação da emissão dos gases na ocasião da primeira campanha de medidas. Após a seleção e classificação das áreas conforme a idade dos RSD, a dimensão da área 1 foi de 42.809m², a área 2 apresentou 55.328m² e a área 3 mediu 49.852 m².

Os ensaios com placa de fluxo nomeados EP-01, EP-02 e EP-05 estavam inseridos na área 1 e os ensaios EP-03 e EP-04 se situavam na área 2. A área 3 não foi contemplada com esse gênero de ensaio na primeira campanha. Com relação aos drenos verticais, os drenos DV-01, DV-02, DV-03, DV-04 e DV-05 foram considerados como inseridos na área 1, os drenos DV-06 e DV-07 na área 2 e os drenos DV-08, DV-09, DV-10, DV-11 e DV-12 na área 3.

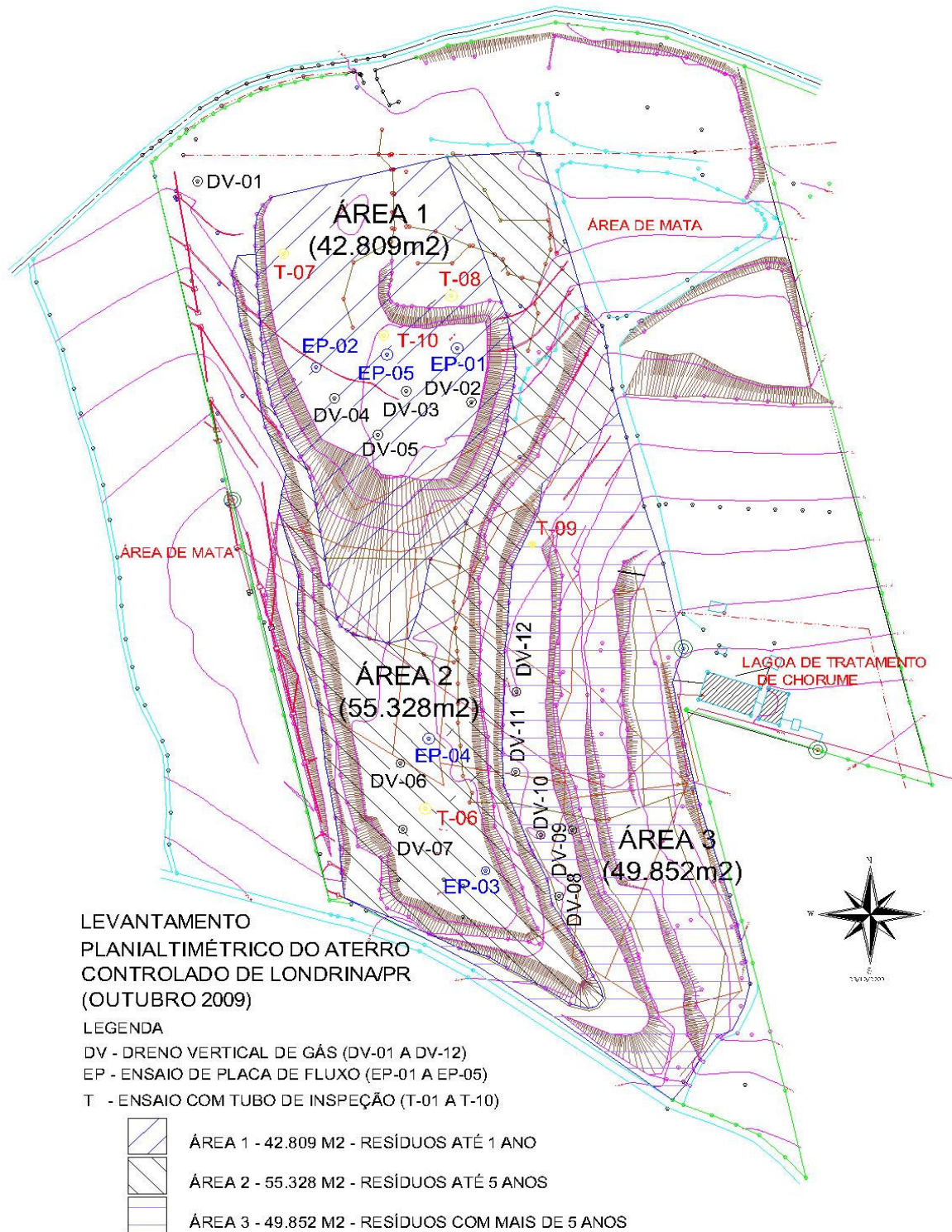


Figura 3.11 – Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na primeira campanha de medidas (outubro/2009)

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Londrina (2009)

O quadro 3.12 esclarece a localização e data de realização dos ensaios realizados na primeira campanha de medidas.

Quadro 3.12: Localização e numeração dos ensaios na primeira campanha de medidas

Pontos número	Localização	Numeração do ensaio			Data
		Placa	Tubo Insp.	Dreno	
01	Platô superior (em operação); distanto 36,0 m do DV-02 e 46,6 m do DV-03	EP-01	T-01	_	17/10/2009
02	Platô superior (em operação); do lado direito da via de acesso; distando 24,0 m do DV-04 e 17,9 m a estaca do talude	EP-02	T-02	_	17/10/2009
03	Próximo ao limite sul do aterro; distando 24,6 m do DV-06	EP-03	T-03	_	17/10/2009
04	Região mais central do aterro; distando 24,6 m do DV-06	EP-04	T-04	_	17/10/2009
05	Platô superior (em operação); distando 68,5 m do DV-02 e 28,0 m do DV-03 (dreno que ficou queimando)	EP-05	T-05	_	18/10/2009
06	Distante 21,5 m do DV-07 e 36,6 m do DV-06	_	T-06	_	17/10/2009
07	Lado direito da via de acesso; distando 84,6 m do EP-02 e 12,3 m do talude	_	T-07	_	18/10/2009
08	Abaixo do platô superior (em operação); distando 8,4 m do talude superior e 42 m do talude próximo à via de acesso	_	T-08	_	18/10/2009
09	Mesma berma dos drenos inferiores (DV-08 a DV-12); distando 27,0 m do tronco alto e 11,7 m do tronco menor	_	T-09	_	18/10/2009
10	Platô superior (em operação); distando 14,5 m do EP-05 e 24,5 m da via de acesso	_	T-10	_	18/10/2009
Dreno 01	Dreno localizado próximo à estrada do Limoeiro (região antiga do aterro)	_	_	DV-01	17/10/2009
Dreno 02	Dreno localizado no platô superior (em operação); próximo ao talude frontal do lado esquerdo da via interna	_	_	DV-02	17/10/2009
Dreno 03	Dreno localizado no platô superior (em operação); o qual ficou queimando durante todo o período de investigação	_	_	DV-03	17/10/2009
Dreno 04	Dreno localizado no platô superior (em operação); lado direito da via de acesso	_	_	DV-04	17/10/2009
Dreno 05	Dreno localizado no platô superior (em operação); mais próximo da frente de operação do aterro	_	_	DV-05	17/10/2009
Dreno 06	Dreno localizado na região do penúltimo patamar; região oposta à frente de operação do aterro	_	_	DV-06	17/10/2009
Dreno 07	Dreno localizado na região do penúltimo patamar; região oposta à frente de operação do aterro	_	_	DV-07	17/10/2009
Dreno 08	Dreno localizado na berma	_	_	DV-08	17/10/2009
Dreno 09	Dreno localizado na berma	_	_	DV-09	17/10/2009
Dreno 10	Dreno localizado na berma	_	_	DV-10	17/10/2009
Dreno 11	Dreno localizado na berma	_	_	DV-11	17/10/2009
Dreno 12	Dreno localizado na berma	_	_	DV-12	17/10/2009
TOTAL		5,0	10,0	12,0	

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

3.3.10. Localização dos pontos de ensaios na segunda campanha de medidas

A segunda campanha de medidas foi realizada em setembro de 2010. Teve características semelhantes aos da primeira campanha, mas objetivava fundamentalmente a avaliação quantitativa do biogás que percolava pelos drenos verticais e pela camada de superfície do aterro de Londrina na ocasião.

Na segunda campanha houve um incremento do número de drenos verticais de gases instalados pela operadora do aterro. Na primeira campanha existiam 12 drenos de gases e na segunda campanha, 22 drenos verticais.

O perfil planialtimétrico do aterro de Londrina no ano de 2010 modificou-se em comparação ao ano de 2009, em função do avanço das operações sobre a área 2. A área 1 mediu 51.535m^2 e a área 2 apresentou 50.506m^2 , enquanto a área 3 (49.852m^2) manteve a dimensão da primeira campanha por não ter sido operada nesse período.

Os ensaios com placa de fluxo foram nomeados P-01 a P-31. A escolha dos pontos para ensaios de placas de fluxo foi realizada em campo, devido aos empecilhos do aterro. Os pontos de ensaio foram locados utilizando os drenos verticais como referência e também por meio de aparelho "GPS".

Na segunda campanha de medidas os drenos verticais foram nomeados DA-01 a DAN-22. Os drenos de DA-01 a DA-12 eram os mesmos existentes na primeira campanha e nomeados DV-01 a DV-12. Os drenos DA-01 a DA-05 estavam posicionados dentro da área 1, juntamente com os novos drenos de gases, nomeados DAN-13 a DAN-22. Na área 2, constatou-se que o dreno DA-06 (DV-06 da primeira campanha) havia sido extinto e o dreno DA-07 (dreno DV-07) havia sofrido modificações para adaptação da tubulação de aço do queimador de gases na extremidade. Na área 3, verificou-se a existência dos drenos DA-08 a DA-10 (DV-08 a DV-10) nas mesmas condições observadas quando da primeira campanha de ensaios. A figura 3.12 mostra a localização de todos os pontos de ensaios realizados na segunda campanha de medidas, bem como o levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina na ocasião da campanha.

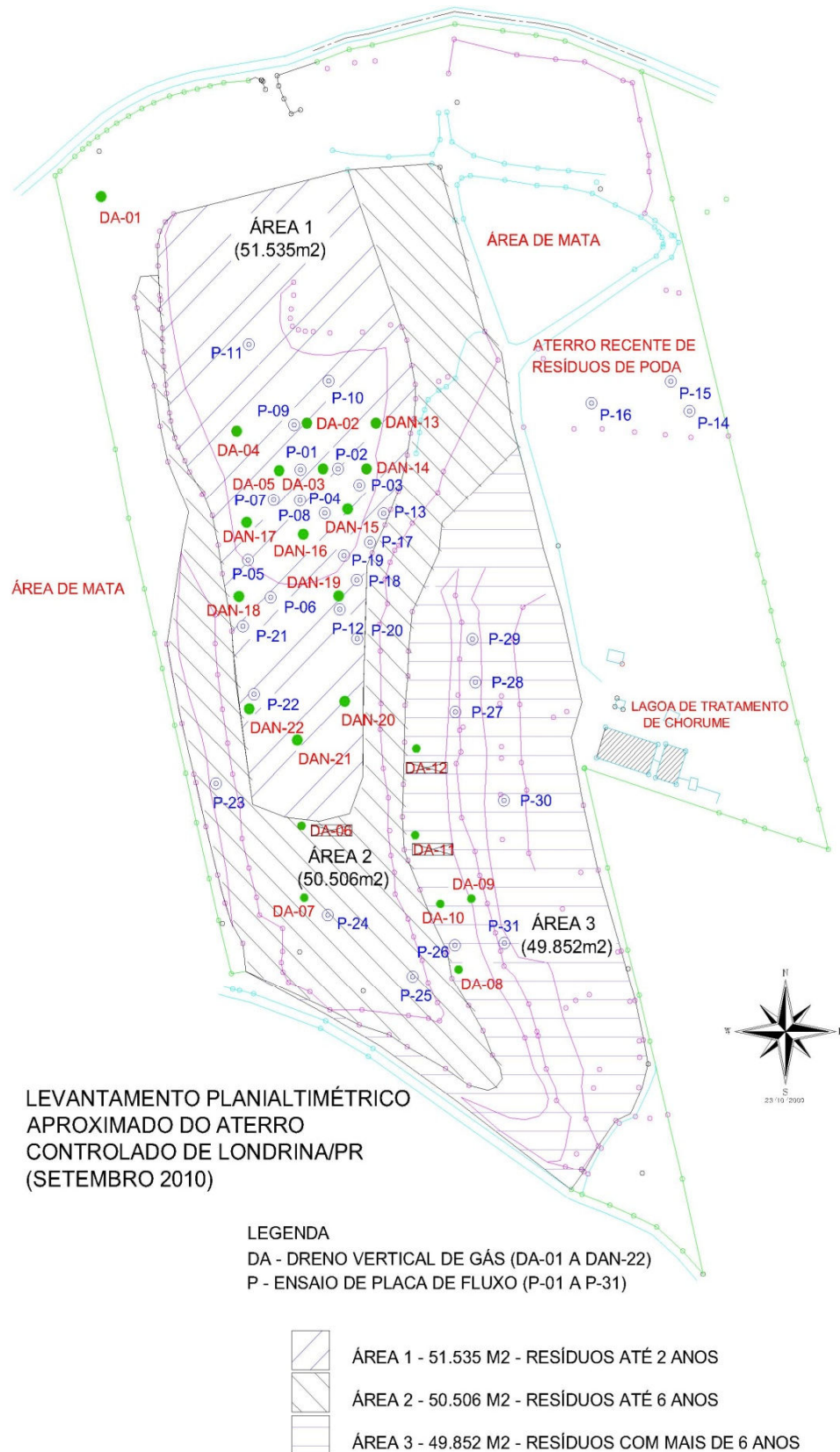


Figura 3.12: Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na ocasião da segunda campanha de medidas (setembro 2010)

Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Londrina (2009)

Para marcação dos dados de campo, utilizaram-se formulários impressos. O quadro 3.13 apresenta o formulário utilizado nos ensaios com placa de fluxo. O quadro 3.14 mostra o formulário utilizado na coleta de dados dos ensaios realizados nos drenos verticais.

Quadro 3.13: Modelo de formulário para as anotações dos ensaios com placa de fluxo utilizado na segunda e terceira campanha de medidas do aterro de Londrina

ENSAIO COM PLACA ESTÁTICA DE FLUXO							
ENSAIO P ___ - DATA: ___/___/2010							
LOCALIZAÇÃO:							
Hora	Patm	Altitude	PORCENTAGEM EM VOLUME NO BIOGÁS				Tinterna
			CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	
	kPa	m	%	%	ppm	%	°C

Quadro 3.14: Modelo de formulário utilizado para as leituras colhidas nos ensaios realizados nos drenos verticais na segunda e terceira campanha de medidas do aterro de Londrina

ENSAIOS REALIZADOS EM DRENOS VERTICAIS												
NOME DO DRENO	COTA ESTIMADA (altitude)	PRESSÃO ATM.	PORCENTAGEM EM VOLUME NO BIOGÁS				TEMP. DO BIOGÁS	VELOCIDADES DO BIOGÁS NA SAÍDA DOS DRENOS				DIÂMETRO INTERNO DO DRENO
			CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S		1	2	3	média	
	m	kPa	%	%	%	ppm	°C	m/s	m/s	m/s	m/s	mm

O quadro 3.15 apresenta a localização e a data de realização dos ensaios com placa de fluxo e drenos verticais, conforme a área em que estavam inseridos.

A figura 3.13 ilustra a placa de fluxo utilizada na segunda campanha, bem como os aparelhos conectados a mesma na ocasião do ensaio.

Quadro 3.15: Localização, nome e data dos ensaios realizados na segunda campanha de medidas

SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS			
LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM PLACA			
Pontos de ensaio	Localização	Nome do ensaio	Data do ensaio
Placas		Placa	
01	ÁREA 1	P-01	06/09/2010
02	ÁREA 1	P-02	06/09/2010
03	ÁREA 1	P-03	06/09/2010
04	ÁREA 1	P-04	06/09/2010
05	ÁREA 1	P-05	06/09/2010
06	ÁREA 1	P-06	06/09/2010
07	ÁREA 1	P-07	06/09/2010
08	ÁREA 1	P-08	06/09/2010
09	ÁREA 1	P-09	06/09/2010
10	ÁREA 1	P-10	06/09/2010
11	ÁREA 1	P-11	06/09/2010
12	ÁREA 1	P-12	07/09/2010
13	ÁREA 1	P-13	07/09/2010
14	ÁREA RESÍDUOS PODA	P-14	07/09/2010
15	ÁREA RESÍDUOS PODA	P-15	07/09/2010
16	ÁREA RESÍDUOS PODA	P-16	07/09/2010
17	ÁREA 1	P-17	07/09/2010
18	ÁREA 1	P-18	07/09/2010
19	ÁREA 1	P-19	07/09/2010
20	ÁREA 1	P-20	07/09/2010
21	ÁREA 1	P-21	07/09/2010
22	ÁREA 1	P-22	07/09/2010
23	ÁREA 2	P-23	07/09/2010
24	ÁREA 2	P-24	07/09/2010
25	ÁREA 2	P-25	07/09/2010
26	ÁREA 3	P-26	07/09/2010
27	ÁREA 3	P-27	17/09/2010
28	ÁREA 3	P-28	17/09/2010
29	ÁREA 3	P-29	17/09/2010
30	ÁREA 3	P-30	17/09/2010
31	ÁREA 3	P-31	17/09/2010
	TOTAL	31,0	

SEGUNDA CAMPANHA DE ENSAIOS			
LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS			
Pontos de ensaio	Localização	Nome do ensaio	Data do ensaio
Drenos		Dreno	
01	ÁREA 1	DA-01	04/09/2010
02	ÁREA 1	DA-02	05/09/2010
03	ÁREA 1	DA-03	05/09/2010
04	ÁREA 1	DA-04	04/09/2010
05	ÁREA 1	DA-05	05/09/2010
06	*	DA-06	05/09/2010
07	ÁREA 2	DA-07	05/09/2010
08	ÁREA 3	DA-08	04/09/2010
09	ÁREA 3	DA-09	04/09/2010
10	ÁREA 3	DA-10	04/09/2010
11	*	DA-11	05/09/2010
12	*	DA-12	05/09/2010
13	ÁREA 1	DAN-13	05/09/2010
14	ÁREA 1	DAN-14	05/09/2010
15	ÁREA 1	DAN-15	05/09/2010
16	ÁREA 1	DAN-16	05/09/2010
17	ÁREA 1	DAN-17	05/09/2010
18	ÁREA 1	DAN-18	05/09/2010
19	ÁREA 1	DAN-19	05/09/2010
20	ÁREA 1	DAN-20	05/09/2010
21	ÁREA 1	DAN-21	05/09/2010
22	ÁREA 1	DAN-22	05/09/2010
	TOTAL	22,0	

* Drenos extintos após a primeira campanha de ensaios

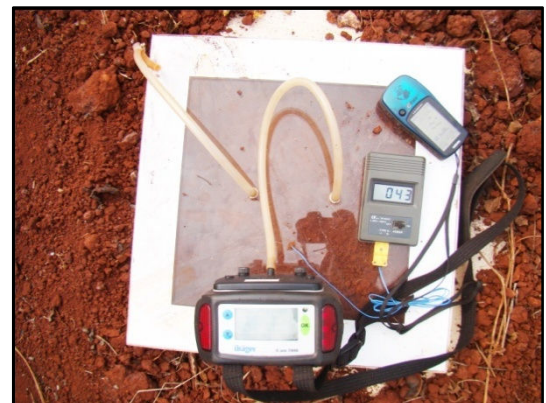


Figura 3.13: Monitoramento do biogás que vaza pela camada de superfície por meio dos ensaios com placa estática de fluxo no aterro de Londrina (segunda e terceira campanhas de medidas)

3.3.11. Localização dos pontos de ensaios na terceira campanha de medidas

A terceira campanha de medidas se realizou em outubro/novembro de 2010. Seus objetivos se assemelharam aos da segunda campanha, buscando essencialmente a quantificação dos gases na ocasião.

A terceira campanha realizou 36 ensaios com placa de fluxo, incrementando cinco ao número de ensaios da segunda campanha. Os drenos verticais de gases foram os mesmos da segunda campanha com o incremento do DAN-23; mas na ocasião da terceira campanha o dreno DA-01 também havia sido eliminado pela operadora do aterro.

No intervalo de tempo transcorrido entre a segunda e a terceira campanha de medidas o perfil planialtimétrico do aterro não sofreu alteração significativa. Por esse motivo, a área 1 (51.535 m²), a área 2 (50.506 m²) e a área 3 (49.852m²) foram mantidas com as mesmas dimensões da segunda campanha.

Os ensaios com placa de fluxo foram nomeados PT-01 a PT-36, sendo que os ensaios PT-01 a PT-21 foram realizados na área 1, os ensaios PT-22 a PT-29 foram realizados na área 2, e os ensaios PT-30 a PT-36 aconteceram na área 3. Os drenos verticais existentes foram nomeados DA-01 a DAN-23, com o incremento de um dreno na numeração dos drenos em relação à segunda campanha. O dreno DAN-23 foi instalado de forma precária pela operadora entre a segunda e a terceira campanha de medidas, motivado pela detecção da grande vazão de gases no local verificada por meio do ensaio de placa estática de fluxo P-13.

Na terceira campanha, o aterro controlado de Londrina foi segmentado em quadrados de 60x60 metros para orientação da locação dos ensaios na superfície. No entanto, o planejamento inicial da locação dos pontos de ensaio com placas não se concretizou plenamente. Os motivos foram os obstáculos existentes sobre a superfície do aterro.

A figura 3.14 mostra o levantamento planialtimétrico simplificado com a localização dos pontos de ensaios e drenos na ocasião da terceira campanha de medidas.

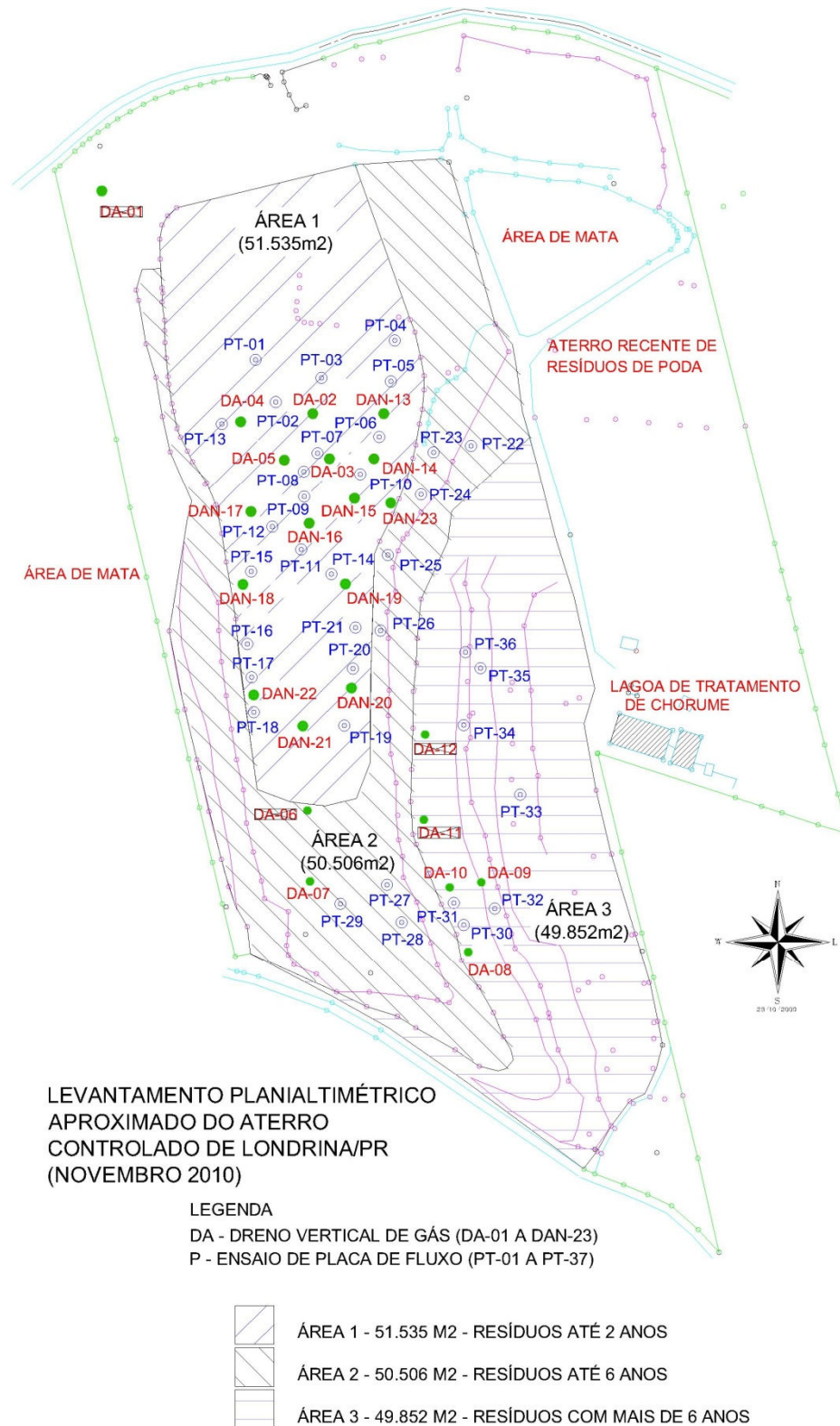


Figura 3.14: Levantamento planialtimétrico simplificado do aterro de Londrina e localização dos pontos de ensaios na da terceira campanha de medidas (novembro/2010)
 Fonte: Adaptado de Prefeitura Municipal de Londrina (2009)

O quadro 3.16 apresenta a localização dos pontos de ensaios com placa de fluxo e a localização dos drenos verticais existentes na terceira campanha de medidas, conforme a área em que estavam inseridos.

Quadro 3.16: Localização, nome e data dos ensaios realizados na terceira campanha de medidas do aterro de Londrina

TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS			
LOCALIZAÇÃO DOS ENSAIOS COM PLACA			
Pontos de ensaio	Localização	Nome do ensaio	Data do ensaio
Placas		Placa	
01	ÁREA 1	PT-01	29/10/2010
02	ÁREA 1	PT-02	29/10/2010
03	ÁREA 1	PT-03	29/10/2010
04	ÁREA 1	PT-04	29/10/2010
05	ÁREA 1	PT-05	29/10/2010
06	ÁREA 1	PT-06	29/10/2010
07	ÁREA 1	PT-07	29/10/2010
08	ÁREA 1	PT-08	29/10/2010
09	ÁREA 1	PT-09	29/10/2010
10	ÁREA 1	PT-10	29/10/2010
11	ÁREA 1	PT-11	29/10/2010
12	ÁREA 1	PT-12	29/10/2010
13	ÁREA 1	PT-13	29/10/2010
14	ÁREA 1	PT-14	29/10/2010
15	ÁREA 1	PT-15	29/10/2010
16	ÁREA 1	PT-16	29/10/2010
17	ÁREA 1	PT-17	29/10/2010
18	ÁREA 1	PT-18	29/10/2010
19	ÁREA 1	PT-19	29/10/2010
20	ÁREA 1	PT-20	29/10/2010
21	ÁREA 1	PT-21	29/10/2010
22	ÁREA 2	PT-22	01/11/2010
23	ÁREA 2	PT-23	01/11/2010
24	ÁREA 2	PT-24	01/11/2010
25	ÁREA 2	PT-25	01/11/2010
26	ÁREA 2	PT-26	01/11/2010
27	ÁREA 2	PT-27	01/11/2010
28	ÁREA 2	PT-28	01/11/2010
29	ÁREA 2	PT-29	01/11/2010
30	ÁREA 3	PT-30	02/11/2010
31	ÁREA 3	PT-31	02/11/2010
32	ÁREA 3	PT-32	02/11/2010
33	ÁREA 3	PT-33	02/11/2010
34	ÁREA 3	PT-34	02/11/2010
35	ÁREA 3	PT-35	02/11/2010
36	ÁREA 3	PT-36	02/11/2010
TOTAL		36,0	

TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS			
LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS			
Pontos de ensaio	Localização	Nome do ensaio	Data do ensaio
Drenos		Dreno	
01	*	DA-01	31/10/2010
02	ÁREA 1	DA-02	31/10/2010
03	ÁREA 1	DA-03	31/10/2010
04	ÁREA 1	DA-04	31/10/2010
05	ÁREA 1	DA-05	31/10/2010
06	*	DA-06	31/10/2010
07	ÁREA 2	DA-07	31/10/2010
08	ÁREA 3	DA-08	31/10/2010
09	ÁREA 3	DA-09	31/10/2010
10	ÁREA 3	DA-10	31/10/2010
11	*	DA-11	31/10/2010
12	*	DA-12	31/10/2010
13	ÁREA 1	DAN-13	31/10/2010
14	ÁREA 1	DAN-14	31/10/2010
15	ÁREA 1	DAN-15	31/10/2010
16	ÁREA 1	DAN-16	31/10/2010
17	ÁREA 1	DAN-17	31/10/2010
18	ÁREA 1	DAN-18	31/10/2010
19	ÁREA 1	DAN-19	31/10/2010
20	ÁREA 1	DAN-20	31/10/2010
21	ÁREA 1	DAN-21	31/10/2010
22	ÁREA 1	DAN-22	31/10/2010
23	ÁREA 2	DAN-23	31/10/2010
TOTAL		23,0	

* Drenos extintos na terceira campanha de ensaios

Na terceira campanha de medidas foram utilizados os mesmos formulários e equipamentos da segunda campanha. As figuras 3.15 e 3.16 ilustram as condições do aterro e as áreas classificadas na ocasião da terceira campanha de medidas.



Figura 3.15: Vista geral da área 1 do aterro controlado de Londrina

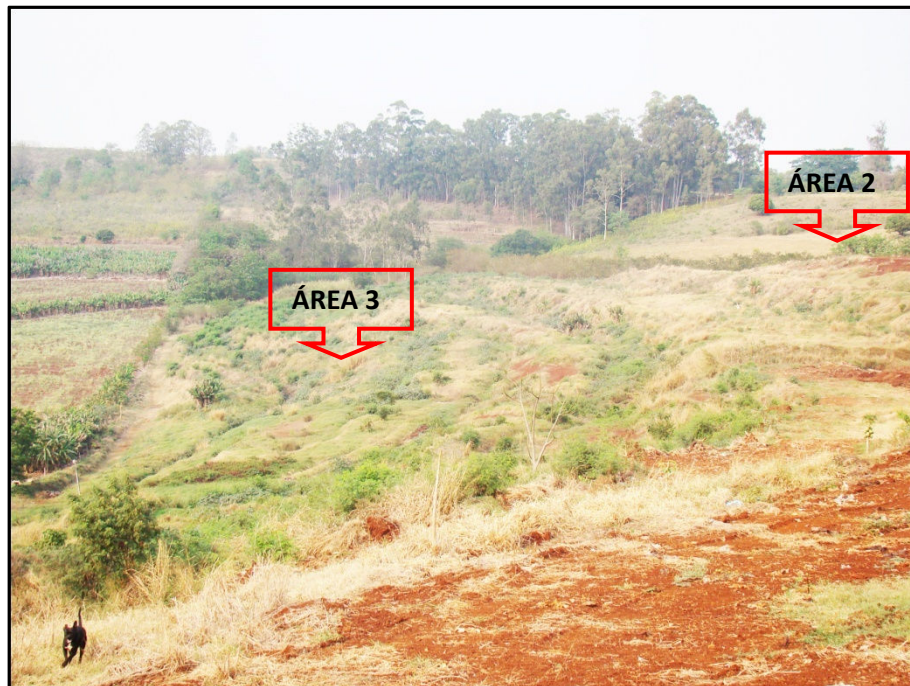


Figura 3.16: Vista da área 3 e parte da área 2 do aterro controlado de Londrina

CAPÍTULO IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Avaliação quantitativa dos resíduos sólidos contidos no aterro controlado de Londrina

Algumas prefeituras de municípios do Brasil não arquivam dados quantitativos e qualitativos dos resíduos sólidos produzidos pelo município. Outras arquivam dados obtidos por quantificação e qualificação expedita. A importância da questão começa a ser levantada, diante da necessidade de estudar as características particulares de cada município no contexto do país.

A Prefeitura de Londrina não tem dados quantitativos e qualitativos sobre a produção dos RSD do município. Para estimar a quantidade de resíduos sólidos depositados no aterro controlado de Londrina desde o início oficial de suas atividades, inicialmente levantou-se a população ao longo desse período. O Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010) fornece alguns dados de população para o município de Londrina no período de 1979, quando o aterro iniciou suas atividades, até o ano de 2010, quando o aterro encerrou suas atividades. As populações dos anos intermediários às populações dos anos fornecidos pelo IBGE foram calculadas considerando um crescimento linear entre as populações contadas.

Para estimar a quantidade de resíduos sólidos produzidos pelo município de Londrina e depositados no aterro controlado, utilizou-se o valor médio de 700 gramas de resíduos diários por cada habitante do município. O número tem sido considerado como valor característico da produção de resíduos depositados no aterro de Londrina. No último ano de atividade do aterro, por exemplo, a produção diária média de resíduos sólidos era de aproximadamente 350 toneladas (estimada a partir do peso dos caminhões que traziam RSD) para uma população estimada em 500.000 habitantes.

O quadro 4.1 mostra os dados fornecidos pelo IBGE, assim como os valores calculados para estimar a quantidade de resíduos sólidos produzidos pelo município no intervalo de tempo de atividade do aterro controlado de Londrina.

Quadro 4.1: Estimativa da população e da quantidade de RSD produzidos pelo município de Londrina

ANO	POPULAÇÃO	RSD PRODUZIDOS	ANO	POPULAÇÃO	RSD PRODUZIDOS
	n°. hab.	ton. RSD/ano		n°. hab.	ton. RSD/ano
1979	321.536	82.152	1995	456.284	116.581
1980*	331.510	84.701	1996	461.291	117.860
1981	341.484	87.249	1997*	466.300	119.140
1982	351.458	89.798	1998	468.374	119.670
1983	361.432	92.346	1999	470.448	120.199
1984	371.406	94.894	2000	472.522	120.729
1985	381.380	97.443	2001	474.596	121.259
1986	391.354	99.991	2002	476.670	121.789
1987	401.328	102.539	2003	478.744	122.319
1988	411.302	105.088	2004*	480.822	122.850
1989	421.276	107.636	2005	484.018	123.667
1990*	431.249	110.184	2006	487.214	124.483
1991	436.256	111.463	2007	490.410	125.300
1992	441.263	112.743	2008	493.606	126.116
1993	446.270	114.022	2009	496.802	126.933
1994	451.277	115.301	2010	500.000	127.750

*Número de habitantes fornecido pelo IBGE (2010)

4.2. Considerações sobre uma composição dos RSD do município de Londrina

O aterro de Londrina se apresenta como um aterro de médias proporções em termos de quantidade de resíduos sólidos depositados. Não existem dados históricos sobre a composição gravimétrica dos RSD produzidos no município.

Conforme apresentado no capítulo II, existe grande variabilidade na composição física dos RSD, mesmo nas diversas regiões de uma cidade. Considerando 32 anos de operação do aterro de Londrina e as alterações sócio-econômicas da cidade no período, a variabilidade pode ser maior. FRÉSCA *et al* (2008) realizaram ensaios no ano de 2005 para determinar a composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no município de São Carlos/SP. Obtiveram grande diversidade de resultados, coletando RSD em quinze setores da cidade, com populações de classes econômicas diferentes e em períodos de verão e inverno.

Devido à ausência de dados históricos sobre a composição gravimétrica dos RSD de Londrina, adotou-se uma composição gravimétrica média do Brasil apresentada por Figueiredo (2009) como meio de avaliar cenários de variação da produção de biogás na aplicação do modelo triangular de Tchobanoglous *et al* (1993). Apesar da ausência dos referidos dados, conhecia-se previamente pelas coletas de materiais recicláveis realizadas no município e por dados de municípios vizinhos que a quantidade de matéria orgânica produzida se enquadrava dentro das médias nacionais. Para complementação e adaptação à realidade de Londrina, foram acrescentados os resíduos de poda de árvores das ruas da cidade, devido ao fato de ser parcela significativa dos RSD depositados no aterro controlado de Londrina. Estimou-se em 10% a participação dos referidos resíduos de poda na composição dos RSD por meio do número médio diário de caminhões depositados no aterro, conforme informações da operadora. Os rejeitos, citados por Figueiredo (2009) como outros materiais incluindo embalagens descartáveis, foram parcelados igualmente em dois gêneros básicos: têxteis e embalagens descartáveis.

O quadro 4.2 apresenta a composição gravimétrica adotada para os resíduos sólidos depositados no aterro controlado de Londrina.

Quadro 4.2: Composição gravimétrica adotada para os RSD do município de Londrina

Tipo de resíduos	Composição gravimétrica (% em peso)
Matéria orgânica (restos de alimentos)	47,2
Madeira (resíduos de poda de árvores em geral)	10,0
Papel e papelão	13,2
Plásticos	16,1
Vidro	2,3
Materiais ferrosos	1,6
Embalagens pet	0,6
Alumínio	0,5
Inertes	0,4
Materiais diversos (embalagens descartáveis)	4,05
Materiais diversos (têxteis)	4,05

Fonte: Adaptado de FIGUEIREDO (2009)

Plásticos, vidro, materiais ferrosos, embalagens pet, alumínio e inertes não influenciam a geração de gases por não serem decompostos nos prazos que o modelo triangular estabelece, ou seja, quinze anos para os componentes lentamente biodegradáveis.

Para avaliar a composição química dos componentes biodegradáveis dos RSD faz-se necessário conhecer a umidade típica dos mesmos. RUSSO *et al* (2005) observaram em suas pesquisas no aterro de Matosinhos os valores de umidades apresentados no quadro 4.3. Essas umidades foram consideradas para aplicação do modelo de estimação de gases como umidades típicas dos componentes dos RSD do aterro de Londrina.

Quadro 4.3: Umidade considerada para os componentes dos RSD adotados para o município de Londrina

Tipo de resíduos	Umidade H (%)
Matéria orgânica	70%
Madeira (resíduos de poda em geral)	20%
Papel e papelão	5,5%
Plásticos	-
Vidro	-
Materiais ferrosos	-
Embalagens pet	-
Alumínio	-
Inertes	-
Materiais diversos (embalagens descartáveis)	5,5%
Materiais diversos (têxteis)	10%

Fonte: adaptado de RUSSO *et al* (2005)

4.3. Aplicação do modelo triangular de Tchobanoglous *et al* para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina

O modelo triangular para a previsão da geração de gases em aterros tem por base a composição dos RSD e as características de biodegradação de seus componentes ao longo do tempo. Tchobanoglous *et al* (1993) adaptaram o comportamento do fenômeno da biodegradação dos resíduos sólidos a um perfil gráfico triangular, em que a altura do triângulo proposto é o ponto de máxima produção de gases. Propôs também a separação dos componentes dos resíduos sólidos em duas classes: resíduos rapidamente biodegradáveis e resíduos lentamente biodegradáveis.

A composição gravimétrica adotada para os RSD do aterro de Londrina, juntamente com a umidade de cada componente, foram apresentadas nos quadros 4.2 e 4.3. A quantidade de RSD produzidos ao longo dos anos de operação do aterro foi mostrada no quadro 4.1.

Tchobanoglous *et al* (1993) definem as parcelas dos elementos químicos que constituem cada componente dos resíduos sólidos em porcentagem, por meio do quadro 4.4. A fração do elemento químico, aplicada diretamente à massa seca do componente da composição gravimétrica, fornecerá a quantidade em massa de cada elemento químico presente. O somatório padronizado das quantidades obtidas resultará no índice de cada elemento químico para composição genérica dos resíduos sólidos em questão. As parcelas rapidamente e lentamente biodegradáveis devem ser consideradas separadamente.

Quadro 4.4: Composição química dos componentes dos RSD

Componentes	Porcentagem em massa (base seca)					
	Carbono	Hidrogênio	Oxigênio	Nitrogênio	Enxofre	Cinzas
Mat. Orgânica (restos de alimentos)	48,0%	6,4%	37,6%	2,6%	0,4%	5,0%
Papel - papelão	43,5%	6,0%	44,0%	0,3%	0,2%	6,0%
Madeira (resíduos de poda em geral)	49,5%	6,0%	42,7%	0,2%	0,1%	1,5%
Mat. diversos (têxteis)	55,0%	6,6%	31,2%	4,6%	0,2%	2,5%
Mat. diversos (emb. descartáveis)	44,0%	5,9%	44,6%	0,3%	0,2%	5,0%

Fonte: adaptada de TCHOBANOUGLOUS *et al* (1993)

Como se observa, a participação do enxofre é pequena em relação aos outros componentes químicos dos resíduos. Por esse motivo, a composição química genérica dos componentes biodegradáveis dos RSD não exibe o enxofre. A composição química dos componentes biodegradáveis dos RSD tem formulação $C_aH_bO_cN_d$, onde *a*, *b*, *c* e *d* são os coeficientes dos elementos químicos que compõem a fórmula química genérica dos RSD.

As frações dos RSD adotada para o aterro controlado de Londrina foram consideradas conforme a classificação abaixo:

- Rapidamente biodegradáveis (RB): matéria orgânica, papel e papelão.
- Lentamente biodegradáveis (LB): madeira (resíduos de poda de árvores em geral), têxteis e embalagens cartonadas.

- Não degradáveis (ND): plásticos, vidro, materiais ferrosos, embalagens pet, alumínio e inertes.

A composição química genérica dos constituintes dos RSD biodegradáveis foi calculada por meio do quadro 4.5, em termos de Carbono, Hidrogênio, Oxigênio e Nitrogênio, e mostra os componentes químicos em porcentagem da massa seca.

Quadro 4.5: Quadro geral para determinação dos coeficientes da equação estequiométrica dos RSD biodegradáveis assumidos para o aterro controlado de Londrina

DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES DA FÓRMULA QUÍMICA DOS RSD BIODEGRADÁVEIS									
APLICAÇÃO DO MODELO TRIANGULAR PARA O ATERRO DE LONDRINA									
	Elemento			C	H	O	N	S	cinzas
	Índice			a	b	c	d		
	Massa atômica (g/mol)			12	1	16	14	32	
COMPONENTES DOS RSD	M fresca	H (%)	M seca	(kg / 100 kg de RSU)					
1. Mat. Orgânica (restos alimentares)	47,2	70,0%	14,16	6,797	0,906	5,324	0,368	0,057	0,708
2. Papel e Papelão	13,2	5,5%	12,47	5,426	0,748	5,489	0,037	0,025	0,748
Rapidamente biodegradáveis (RB)			26,63	12,223	1,655	10,813	0,406	0,082	1,456
5. Madeira (resíduos poda em geral)	10,00	20,0%	8,00	3,960	0,480	3,416	0,016	0,008	0,120
6. Diversos (têxteis)	4,05	10,0%	3,65	2,005	0,241	1,137	0,168	0,007	0,091
7. Diversos (emb. cartonada)	4,05	5,5%	3,83	1,684	0,226	1,707	0,011	0,008	0,191
Lentamente biodegradáveis (LB)			15,47	7,649	0,946	6,260	0,195	0,023	0,402
	(número moles RB)			1,019	1,655	0,676	0,029	0,003	0,000
	(número moles LB)			0,637	0,946	0,391	0,014	0,001	0,000
	Índice da fórmula química aproximada sem enxofre e normalizada para N=1								
	Índices			a	b	c	d	enxofre	cinzas
	(RB)			35,2	57,1	23,3	1,0	0	0
	(LB)			45,7	67,9	28,1	1,0	0	0

Fonte: Adaptado de RUSSO *et al* (2005)

Constata-se que a participação de enxofre na composição dos componentes biodegradáveis dos RSD não é significativa em termos numéricos em relação aos outros elementos químicos. Para elaboração do quadro 4.5, utilizaram-se os seguintes conceitos:

- Massa atômica: é a massa atômica do elemento químico a ser considerado: carbono, hidrogênio, oxigênio, nitrogênio e enxofre.
- Massa fresca (M fresca): é a parcela do componente dos RSD com sua umidade característica (H%).
- Massa seca (M seca): é a parcela do componente dos RSD extraída sua umidade característica (H%).

- Número de moles RB: é a somatória em moles dos componentes dos RSD considerados rapidamente biodegradáveis (RB), multiplicada pela parcela em porcentagem do elemento químico em questão e dividida pela massa atômica deste elemento químico.
- Número de moles LB: é a somatória em moles dos componentes dos RSD considerados lentamente biodegradáveis (LB), multiplicada pela parcela em porcentagem do elemento químico em questão e dividida pela massa atômica deste elemento químico.
- Índices da fórmula química: é o coeficiente resultante da normalização do número de moles (nM) para N=1 (Nitrogênio), e desprezando a participação do enxofre.
- Materiais inertes: não apresentados no quadro 4.5, representam 21,5% da composição gravimétrica dos RSD, somadas as participações de plásticos, vidro, materiais ferrosos, embalagens pet, alumínio e inertes.

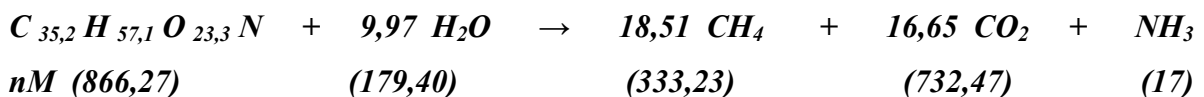
Com os índices calculados por meio do quadro 4.5, as fórmulas que representam as médias genéricas de constituição dos RSD para as frações rapidamente e lentamente biodegradáveis podem ser escritas.

Rapidamente biodegradáveis: $C_{35,2} H_{57,1} O_{23,3} N$

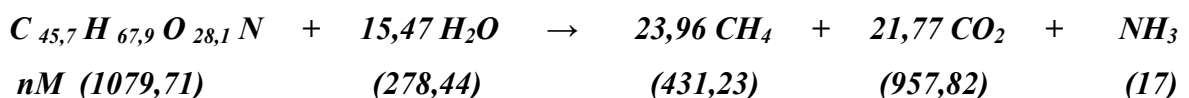
Lentamente biodegradáveis: $C_{45,7} H_{67,9} O_{28,1} N$

Para determinação da taxa de produção de biogás faz-se necessário realizar o balanço da equação estequiométrica, em suas frações rapidamente e lentamente biodegradáveis, supondo-se conversão completa dos resíduos orgânicos biodegradáveis em CO_2 , CH_4 e NH_3 (TCHOBANOGLIOUS *et al*, 1993).

- Rapidamente biodegradáveis: $C_{35,3} H_{57,1} O_{23,3} N$



- Lentamente biodegradáveis: $C_{45,7} H_{67,9} O_{28,1} N$



Considerando os pesos específicos do metano ($0,716 \text{ kg/m}^3$) e do dióxido de carbono ($1,978 \text{ kg/m}^3$), os volumes produzidos por unidade de peso seco da matéria orgânica podem ser calculados (RUSSO *et al*, 2005).

➤ Rapidamente biodegradáveis:

$$V_{CH_4} = (333,23 * 0,2663) / (866,27 * 0,716) = 0,1431 \text{ m}^3/\text{kg de RSD}$$

$$V_{CO_2} = (732,37 * 0,2663) / (866,27 * 1,978) = 0,1138 \text{ m}^3/\text{kg de RSD}$$

➤ Lentamente biodegradáveis:

$$V_{CH_4} = (431,23 * 0,1547) / (1079,71 * 0,716) = 0,0863 \text{ m}^3/\text{kg de RSD}$$

$$V_{CO_2} = (957,82 * 0,1547) / (1079,71 * 1,978) = 0,0694 \text{ m}^3/\text{kg de RSD}$$

Os volumes unitários encontrados representam as taxas teóricas de produção de gás metano e de dióxido de carbono por unidade de peso dos RSD depositados, nas suas frações rápida e lentamente biodegradáveis. Em termos de biogás, teríamos a taxa específica teórica estimada para o aterro de Londrina mostrada no quadro 4.6.

Quadro 4.6: Taxa específica teórica da produção de biogás no aterro controlado de Londrina

Componentes dos Resíduos Sólidos Domésticos	Taxa específica ($\text{m}^3 / \text{kg RSD}$)		
	CH ₄	CO ₂	BIOGÁS
Rapidamente Biodegradável (RB)	0,1431	0,1138	0,2569
Lentamente Biodegradável (LB)	0,0863	0,0694	0,1557
Total	0,2294	0,1832	0,4126

Fonte: Adaptado de RUSSO *et al* (2005)

As taxas específicas teóricas de produção de biogás não podem ser aplicadas diretamente aos RSD depositados, pois supõem condições ideais dificilmente constatáveis nos aterros. Alguns parâmetros obtidos empiricamente são aplicados para aproximar as condições de campo. O primeiro considera a indisponibilidade de 25% dos resíduos rapidamente biodegradáveis e de 50% dos resíduos lentamente biodegradáveis, ocasionados principalmente pela acomodação dos resíduos sólidos em sacos plásticos (TCHOBANOUGLOUS *et al*, 1993). O segundo parâmetro avalia que o rendimento metabólico

ideal não acontece nos aterros, por fatores como as constantes alterações climáticas e a heterogeneidade da umidade na massa de lixo. Aplica-se, assim, um rendimento metabólico de 25% obtido empiricamente em pesquisas realizadas nos aterros (RUSSO *et al*, 2005).

Para aplicação do modelo triangular, admite-se que a máxima produção de biogás ocorre no primeiro ano para os componentes rapidamente biodegradáveis e no quinto ano para os componentes lentamente biodegradáveis. Os anos de contribuição para o ano de inventário receberam o coeficiente relativo ao desenvolvimento triangular adotado para o fenômeno.

Para cada componente o valor em peso de RSD depositados foi alterado pelos coeficientes de indisponibilidade respectivos, além do coeficiente de rendimento metabólico. Aplicaram-se as taxas específicas teóricas de produção de gás metano para os componentes rapidamente ou lentamente biodegradável dos RSD.

A produção de gás metano em um ano considerou separadamente os componentes rapidamente e lentamente biodegradáveis, produzindo o somatório do ano do inventário e dos anos de contribuição anteriores.

A produção total de gás metano no ano foi obtida pela soma das parcelas calculadas separadamente dos componentes rapidamente e lentamente biodegradáveis dos RSD.

Os procedimentos de cálculos foram repetidos posteriormente para a obtenção do volume de dióxido de carbono, utilizando as taxas específicas teóricas de produção desse gás.

O quadro 4.7 exhibe os cálculos para a produção de metano ao longo dos anos desde o início das atividades no aterro de Londrina até o fechamento em 2010. Estima ainda, conforme as possibilidades do modelo, o gás metano produzido nos anos seguintes ao fechamento.

Quadro 4.7: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina obtida com a aplicação do modelo triangular

PRODUÇÃO DE GÁS METANO PARA O ATERRO DE LONDRINA				
APLICAÇÃO DO MODELO TRIANGULAR				
ANO	RSD DEPOSITADOS NO ANO	VOLUME DE CH₄ GERADO PELOS RB	VOLUME DE CH₄ GERADO PELOS LB	VOLUME TOTAL DE CH₄ GERADO
	ton./ano	Nm³/ano	Nm³/ano	Nm³/ano
1979	82.152	551.027	177.259	728.285
1980	84.701	1.687.265	537.275	2.224.540
1981	87.249	3.442.901	1.085.546	4.528.448
1982	89.798	5.852.121	1.827.572	7.679.693
1983	92.346	6.023.049	2.768.851	8.791.900
1984	94.894	6.193.976	3.648.993	9.842.970
1985	97.443	6.364.904	4.465.250	10.830.154
1986	99.991	6.535.831	5.214.871	11.750.702
1987	102.539	6.706.759	5.895.108	12.601.867
1988	105.088	6.877.687	6.503.210	13.380.897
1989	107.636	7.048.614	7.036.430	14.085.045
1990	110.184	7.219.535	7.492.017	14.711.553
1991	111.463	7.356.409	7.864.484	15.220.893
1992	112.743	7.467.749	8.148.343	15.616.092
1993	114.022	7.562.066	8.338.107	15.900.172
1994	115.301	7.647.872	8.516.917	16.164.789
1995	116.581	7.733.679	8.682.036	16.415.715
1996	117.860	7.819.485	8.834.833	16.654.318
1997	119.140	7.905.306	8.976.679	16.881.984
1998	119.670	7.971.029	9.107.326	17.078.355
1999	120.199	8.021.642	9.226.525	17.248.167
2000	120.729	8.062.205	9.334.028	17.396.233
2001	121.259	8.097.743	9.429.588	17.527.331
2002	121.789	8.133.285	9.512.955	17.646.240
2003	122.319	8.168.834	9.586.306	17.755.140
2004	122.850	8.204.411	9.651.823	17.856.234
2005	123.667	8.247.669	9.712.303	17.959.972
2006	124.483	8.296.687	9.769.171	18.065.858
2007	125.300	8.349.543	9.823.855	18.173.398
2008	126.116	8.404.314	9.877.782	18.282.095
2009	126.933	8.459.084	9.932.373	18.391.458
2010	127.750	8.513.869	9.988.131	18.502.000
2011	0	5.119.278	9.768.149	14.887.427
2012	0	2.565.118	9.271.164	11.836.282
2013	0	856.866	8.495.106	9.351.972
2014	0	0	7.437.902	7.437.902
2015	0	0	6.097.480	6.097.480
2016	0	0	4.887.878	4.887.878
2017	0	0	3.809.666	3.809.666
2018	0	0	2.863.416	2.863.416
2019	0	0	2.049.703	2.049.703
2020	0	0	1.369.405	1.369.405
2021	0	0	823.405	823.405
2022	0	0	412.584	412.584
2023	0	0	137.822	137.822
2024	0	0	0	0
2025	0	0	0	0

Fonte: adaptado de BRAZ *et al*, (2003)

A produção total de gás metano no ano de encerramento das operações no aterro controlado de Londrina (2010) foi de 18.502.000 Nm³/ano. O comportamento gráfico do modelo, considerando a aplicação do modelo triangular ao longo dos 32 anos de funcionamento é apresentado na figura 4.1.

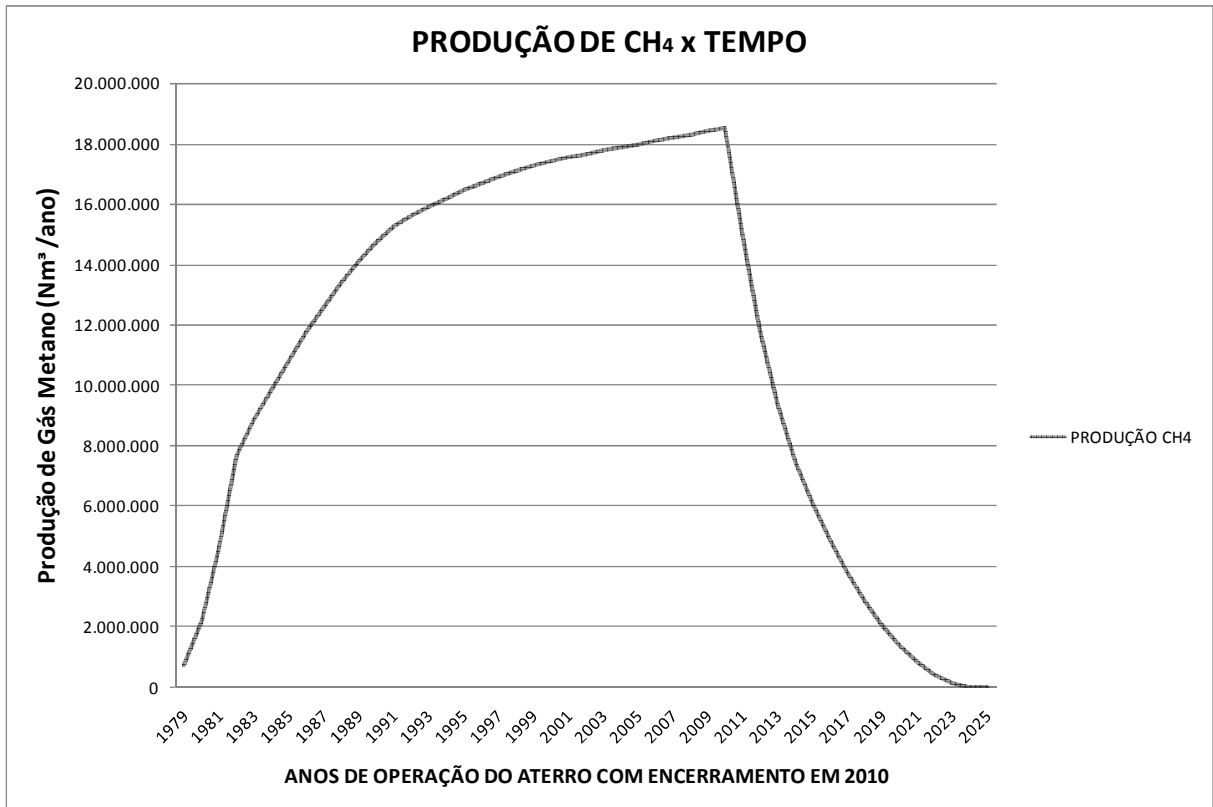


Figura 4.1: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo a partir da aplicação do modelo triangular para o aterro controlado de Londrina

O crescimento da produção de gás metano se mostra com tendência assintótica. No ano de 2010 ocorreu a severa interrupção da entrada de RSD, que foi demonstrada com uma queda rápida na produção de gás metano e anulação teórica da geração do gás em quinze anos.

Para estimar a produção de biogás no aterro a partir do modelo triangular foi necessário repetir o cálculo para o gás carbônico, conforme as taxas específicas teóricas do gás. A emissão de gás carbônico no ano de 2010, somando-se as parcelas rapidamente e lentamente biodegradáveis, resultou em 14.804.835 Nm³/ano. A soma das estimativas de gás metano e gás carbônico para o ano de encerramento do aterro controlado de Londrina totalizou 33.306.835 Nm³/ano de biogás.

A simplificação utilizada para calcular o volume total de biogás, a partir da adição dos volumes de gás metano e gás carbônico, não compromete o volume final do biogás em termos quantitativos, pois outros gases não apresentam volume significativo nesse contexto. Alguns modelos matemáticos sugerem que a fração de gás carbônico presente no biogás seja igual à fração de gás metano, com a soma das duas frações completando o volume de biogás.

A utilização do modelo triangular permitiu a confecção de cenários de produção de biogás, conforme a composição gravimétrica fosse modificada. Diante da provável variabilidade da composição gravimétrica dos RSD do município de Londrina, constituiu-se o quadro 4.8 com cinco cenários de composição gravimétrica, além da composição adotada. A produção de biogás relativa a cada composição se refere às quantidades de RSD depositados no aterro de Londrina e utilizadas também nos outros modelos teóricos, conforme o quadro 4.1.

Quadro 4.8: Aplicação do modelo triangular à diversas composições gravimétricas para avaliar cenários e estimar a produção de biogás no aterro de Londrina

APLICAÇÃO DO MODELO TRIANGULAR							
PRODUÇÃO DE BIOGÁS PARA DIVERSOS CENÁRIOS DE COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA							
Componentes biodegradáveis da composição gravimétrica	Velocidade de biodegradação	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Composição adotada
Mat. Orgânica (restos de alimentos)	RB	57,20%	52,20%	52,20%	52,20%	47,20%	47,20%
Papel e papelão	RB	8,20%	8,20%	8,20%	8,20%	8,20%	13,20%
Madeira (resíduos de poda em geral)	LB	5,00%	10,00%	10,00%	10,00%	15,00%	10,00%
Diversos (texteis)	LB	4,05%	4,05%	0,00%	8,10%	4,05%	4,05%
Diversos (emb. cartonada)	LB	4,05%	4,05%	8,10%	0,00%	4,05%	4,05%
Subtotal		78,50%	78,50%	78,50%	78,50%	78,50%	78,50%
Biogás gerado no ano 2010 (Nm³/ano)		27.916.035	31.625.338	30.962.452	32.276.754	35.334.957	33.306.835

4.4. Aplicação do modelo de primeira ordem adotado pela USEPA para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina

O modelo USEPA (1998) assume que a produção de gás metano a partir dos RSD depositados no aterro tende a decrescer com o aumento da idade do resíduo. Quando se estabelece um ano de inventário, a produção de metano será obtida pela somatória das produções de metano ao longo dos anos anteriores ao do inventário. Os resíduos sólidos depositados nos primeiros anos de funcionamento do aterro têm produção de metano menor que os resíduos mais recentes.

Para a aplicação do modelo USEPA (1998) ao aterro controlado de Londrina fez-se necessária a adoção de alguns parâmetros sugeridos pelos autores do modelo. Conforme apresentado no capítulo III, os parâmetros de entrada do modelo são a massa de resíduos depositada, o tempo de atividade e fechamento, o potencial de geração de metano e taxa de geração de metano. Os valores adotados para esses parâmetros são a seguir apresentados:

- Massa de resíduos depositada anualmente no aterro: $R =$ (quadro 4.1)
- Tempo de atividade ou de fechamento do aterro: $t = 32$ anos.
- Potencial de geração de metano: $L_o = 170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. resíduo depositado}$
- Taxa de geração de metano: $k = 0,05 \text{ anos}^{-1}$

A massa de RSD depositada no aterro foi obtida conforme apresentado no quadro 4.1. O tempo de funcionamento inclui a atividade do aterro de Londrina desde o ano de 1.979 até o seu fechamento em 2010, perfazendo 32 anos de atividade. Os valores do potencial de geração de metano e da taxa de geração de metano são valores sugeridos pelo Banco Mundial (2003) e pela USEPA.

Conforme a equação matemática 3.2 apresentada para o modelo, teremos:

$$Q_{CH_4} = L_o \cdot R \cdot (e^{-k \cdot c} - e^{-k \cdot t}) \quad \text{(Equação 3.2)}$$

Onde:

Q_{CH_4} = quantidade de metano produzida por ano (Nm^3/ano)

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

L_o = 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 (ton./ano)

t = tempo desde o início do depósito dos resíduos (32 anos)

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

e = base log, sem unidade.

Aplicando os parâmetros admitidos para o aterro controlado de Londrina na equação apresentada, ao longo dos 32 anos, obtiveram-se os resultados apresentados no quadro 4.9.

Quadro 4.9: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina obtida com a aplicação do modelo USEPA (1998)

PRODUÇÃO DE GÁS METANO PARA O ATERRO DE LONDRINA						
APLICAÇÃO DO MODELO USEPA (1998)						
ANO	ANOS DE OPERAÇÃO ATÉ ENCERRAMENTO	RSD DEPOSITADOS ANUALMENTE	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO (Lo)	ANOS APÓS FECHAMENTO	TAXA DE GERAÇÃO DE METANO (k)	TOTAL DE GERAÇÃO DE GÁS METANO
	t (anos)	ton./ano	Nm³ CH₄/ton. RSD	c (anos)	1/ano	Nm³ /ano
1.979	1	82.152	170,00	0	0,050	681.106
1.980	2	84.701	170,00	0	0,050	1.370.220
1.981	3	87.249	170,00	0	0,050	2.065.971
1.982	4	89.798	170,00	0	0,050	2.767.105
1.983	5	92.346	170,00	0	0,050	3.472.470
1.984	6	94.894	170,00	0	0,050	4.181.018
1.985	7	97.443	170,00	0	0,050	4.891.790
1.986	8	99.991	170,00	0	0,050	5.603.915
1.987	9	102.539	170,00	0	0,050	6.316.600
1.988	10	105.088	170,00	0	0,050	7.029.128
1.989	11	107.636	170,00	0	0,050	7.740.850
1.990	12	110.184	170,00	0	0,050	8.451.159
1.991	13	111.463	170,00	0	0,050	9.056.456
1.992	14	112.743	170,00	0	0,050	9.648.376
1.993	15	114.022	170,00	0	0,050	10.227.301
1.994	16	115.301	170,00	0	0,050	10.793.610
1.995	17	116.581	170,00	0	0,050	11.347.672
1.996	18	117.860	170,00	0	0,050	11.889.853
1.997	19	119.140	170,00	0	0,050	12.420.564
1.998	20	119.670	170,00	0	0,050	12.859.525
1.999	21	120.199	170,00	0	0,050	13.283.087
2.000	22	120.729	170,00	0	0,050	13.691.923
2.001	23	121.259	170,00	0	0,050	14.086.676
2.002	24	121.789	170,00	0	0,050	14.467.963
2.003	25	122.319	170,00	0	0,050	14.836.370
2.004	26	122.850	170,00	0	0,050	15.192.590
2.005	27	123.667	170,00	0	0,050	15.573.009
2.006	28	124.483	170,00	0	0,050	15.943.401
2.007	29	125.300	170,00	0	0,050	16.304.168
2.008	30	126.116	170,00	0	0,050	16.655.700
2.009	31	126.933	170,00	0	0,050	16.998.368
2.010	32	127.750	170,00	0	0,050	17.332.601
2.011	32	127.750	170,00	1	0,050	16.273.427
2.012	32	127.750	170,00	2	0,050	15.265.909
2.013	32	127.750	170,00	3	0,050	14.307.529
2.014	32	127.750	170,00	4	0,050	13.395.889
2.015	32	127.750	170,00	5	0,050	12.528.710
2.016	32	127.750	170,00	6	0,050	11.703.824
2.017	32	127.750	170,00	7	0,050	10.919.168
2.018	32	127.750	170,00	8	0,050	10.172.781
2.019	32	127.750	170,00	9	0,050	9.462.795
2.020	32	127.750	170,00	10	0,050	8.787.435
2.021	32	127.750	170,00	11	0,050	8.145.013
2.022	32	127.750	170,00	12	0,050	7.533.923
2.023	32	127.750	170,00	13	0,050	6.952.635
2.024	32	127.750	170,00	14	0,050	6.399.698
2.025	32	127.750	170,00	15	0,050	5.873.727

O comportamento gráfico do modelo matemático sugere um crescimento próximo a linearidade para a geração de gás metano ao longo dos anos, com a maximização da produção no ano trinta e dois (2010). O valor máximo de gás metano obtido pelo modelo USEPA para o aterro de Londrina foi de 17.332.601 Nm³/ano. O modelo matemático em questão necessita que se continue alimentando-o com a taxa média de resíduos depositados ao longo dos anos para se obter a previsão de metano produzido após o fechamento. Caso contrário, existe a suspensão da produção de metano por ser anulada a equação matemática.

Com o encerramento das atividades do aterro no ano 2010 a produção de gás metano, que cresceu até então, passa a decrescer, conforme apresentado na figura 4.2.

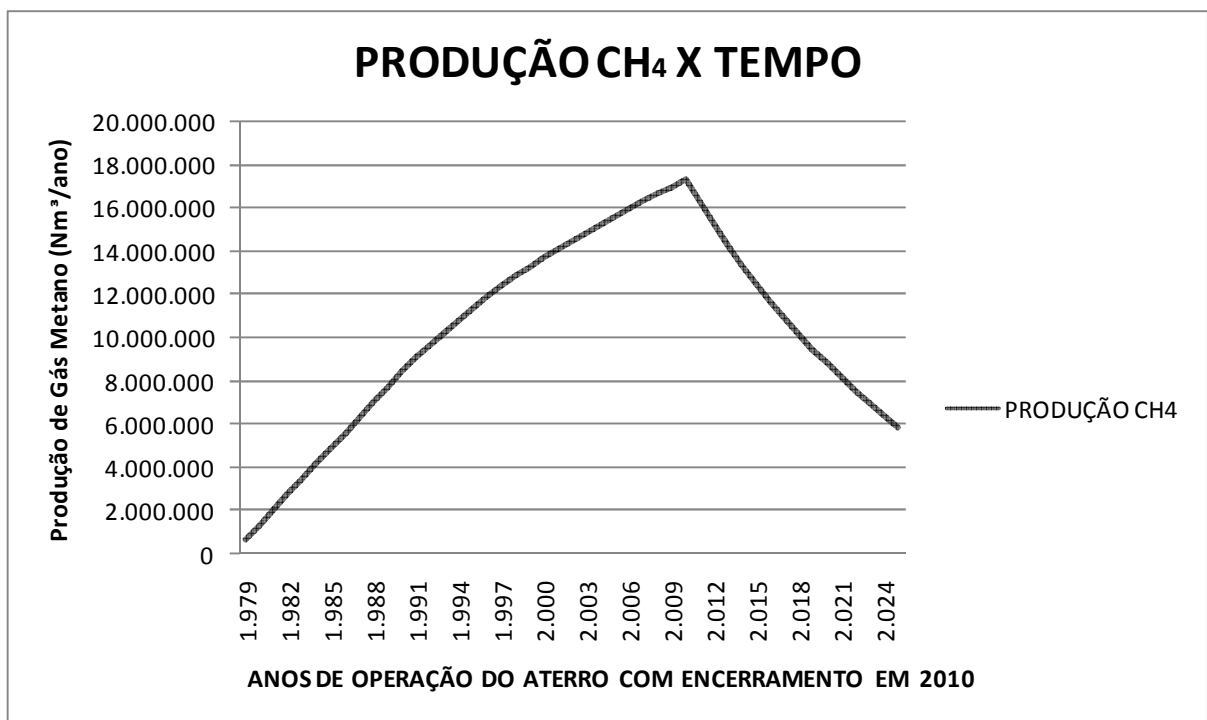


Figura 4.2: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo por meio da aplicação do modelo USEPA para o aterro controlado de Londrina

A estimativa total do biogás gerado no aterro de Londrina pode ser obtida considerando que o volume de gás carbônico se equipara ao volume de gás metano produzido. Desta forma, o volume de gás carbônico gerado no aterro seria de 17.332.601 Nm³/ano de CO₂. O volume total de biogás estimado para o aterro, utilizando o modelo pela USEPA (1998), seria de 34.665.202 Nm³/ano.

4.5. Aplicação do software Landgem 3.02 para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina

A utilização do programa Landgem 3.02 (USEPA, 2005) para avaliar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina possibilita estimar o volume de gás metano, de gás carbônico e de outros gases presentes na composição final das emissões.

Na versão original do programa, alguns parâmetros são sugeridos como característicos de aterros. O quadro 4.10 exhibe os parâmetros indicados.

Quadro 4.10 – Valores de parâmetros adotados no software Landgem 3.02

Parâmetros do modelo		
Taxa de geração de metano	k (anos ⁻¹)	0,05
Potencial de geração de metano	L _o (Nm ³ CH ₄ /ton. resíduo)	170
Concentração de NMOC	ppmv	4.000
Conteúdo de gás metano no biogás	% volume	50

Fonte: USEPA (2005)

A partir dos parâmetros sugeridos (USEPA, 2005) e dos dados de quantificação de RSD apresentados no quadro 4.1 para o aterro de Londrina, tornou-se possível o cálculo da geração de gases antes do encerramento das atividades do aterro em 2010. O programa também estima as quantidades de gases produzidos anualmente após o fechamento do aterro, por vários anos.

Seguindo as sequências adotadas nas outras seções desse trabalho, os cálculos realizados deram ênfase à produção de gás metano e de gás carbônico como principais componentes do biogás. Mas o programa propiciou estimar a produção dos gases NMOC (non methane organic compounds), presentes no biogás em pequenas quantidades. A quantificação total do biogás produzido pelo aterro controlado de Londrina foi obtida pela soma dos dois gases principais, considerando que o gás carbônico produzido representa a mesma quantidade que o metano. O quadro 4.11 exhibe os resultados obtidos com a aplicação do programa Landgem 3.02.

Quadro 4.11: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina obtida com a aplicação do software Landgem 3.02

PRODUÇÃO DE GASES NO ATERRO DE LONDRINA						
APLICAÇÃO DO SOFTWARE LANDGEM 3.02						
ANO	ANOS FUNCIONAMENTO	RSD DEPOSITADOS	GERAÇÃO DE GÁS METANO	GERAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO	GERAÇÃO DE NMOC	GERAÇÃO DE BIOGÁS
	anos	ton/ano	Nm³/ano	Nm³/ano	Nm³/ano	Nm³/ano
1979	1	82.152	682.830	682.830	5.463	1.365.660
1980	2	84.701	1.353.539	1.353.539	10.828	2.707.079
1981	3	87.249	2.012.719	2.012.719	16.102	4.025.438
1982	4	89.798	2.660.931	2.660.931	21.287	5.321.863
1983	5	92.346	3.298.711	3.298.711	26.390	6.597.423
1984	6	94.894	3.926.568	3.926.568	31.413	7.853.136
1985	7	97.443	4.544.985	4.544.985	36.360	9.089.969
1986	8	99.991	5.154.422	5.154.422	41.235	10.308.844
1987	9	102.539	5.755.318	5.755.318	46.043	11.510.636
1988	10	105.088	6.348.090	6.348.090	50.785	12.696.179
1989	11	107.636	6.933.132	6.933.132	55.465	13.866.265
1990	12	110.184	7.510.822	7.510.822	60.087	15.021.643
1991	13	111.463	8.070.970	8.070.970	64.568	16.141.939
1992	14	112.743	8.614.432	8.614.432	68.915	17.228.864
1993	15	114.022	9.142.023	9.142.023	73.136	18.284.045
1994	16	115.301	9.654.516	9.654.516	77.236	19.309.031
1995	17	116.581	10.152.647	10.152.647	81.221	20.305.294
1996	18	117.860	10.637.117	10.637.117	85.097	21.274.234
1997	19	119.140	11.108.597	11.108.597	88.869	22.217.194
1998	20	119.670	11.561.487	11.561.487	92.492	23.122.974
1999	21	120.199	11.996.693	11.996.693	95.974	23.993.387
2000	22	120.729	12.415.079	12.415.079	99.321	24.830.159
2001	23	121.259	12.817.465	12.817.465	102.540	25.634.929
2002	24	121.789	13.204.630	13.204.630	105.637	26.409.260
2003	25	122.319	13.577.317	13.577.317	108.619	27.154.635
2004	26	122.850	13.936.241	13.936.241	111.490	27.872.483
2005	27	123.667	14.284.448	14.284.448	114.276	28.568.896
2006	28	124.483	14.622.459	14.622.459	116.980	29.244.919
2007	29	125.300	14.950.773	14.950.773	119.606	29.901.546
2008	30	126.116	15.269.862	15.269.862	122.159	30.539.723
2009	31	126.933	15.580.175	15.580.175	124.641	31.160.351
2010	32	127.750	15.882.146	15.882.146	127.057	31.764.293
2011	0	0	15.107.565	15.107.565	120.861	30.215.130
2012	0	0	14.370.760	14.370.760	114.966	28.741.520
2013	0	0	13.669.890	13.669.890	109.359	27.339.780
2014	0	0	13.003.202	13.003.202	104.026	26.006.403
2015	0	0	12.369.028	12.369.028	98.952	24.738.056
2016	0	0	11.765.783	11.765.783	94.126	23.531.567
2017	0	0	11.191.959	11.191.959	89.536	22.383.919
2018	0	0	10.646.121	10.646.121	85.169	21.292.242
2019	0	0	10.126.904	10.126.904	81.015	20.253.807
2020	0	0	9.633.009	9.633.009	77.064	19.266.017
2021	0	0	9.163.201	9.163.201	73.306	18.326.403
2022	0	0	8.716.307	8.716.307	69.730	17.432.613
2023	0	0	8.291.207	8.291.207	66.330	16.582.415
2024	0	0	7.886.840	7.886.840	63.095	15.773.681
2025	0	0	7.502.195	7.502.195	60.018	15.004.389

O volume de gás metano produzido no ano de encerramento das atividades do aterro de Londrina (2010) foi de 15.882.146 Nm³/ano. O volume de gás carbônico se igualou ao de gás metano, conforme admite o programa, perfazendo 31.764.293 Nm³/ano de biogás gerado no ano de encerramento do aterro. Outros gases existentes na composição do biogás (NMOC) quantificaram 127.057 Nm³/ano.

O programa Landgem 3.02 também permitiu avaliações gráficas dos gases produzidos no aterro. A figura 4.3 demonstra o comportamento de cada gás gerado pelo aterro, tanto antes como depois do encerramento das atividades.

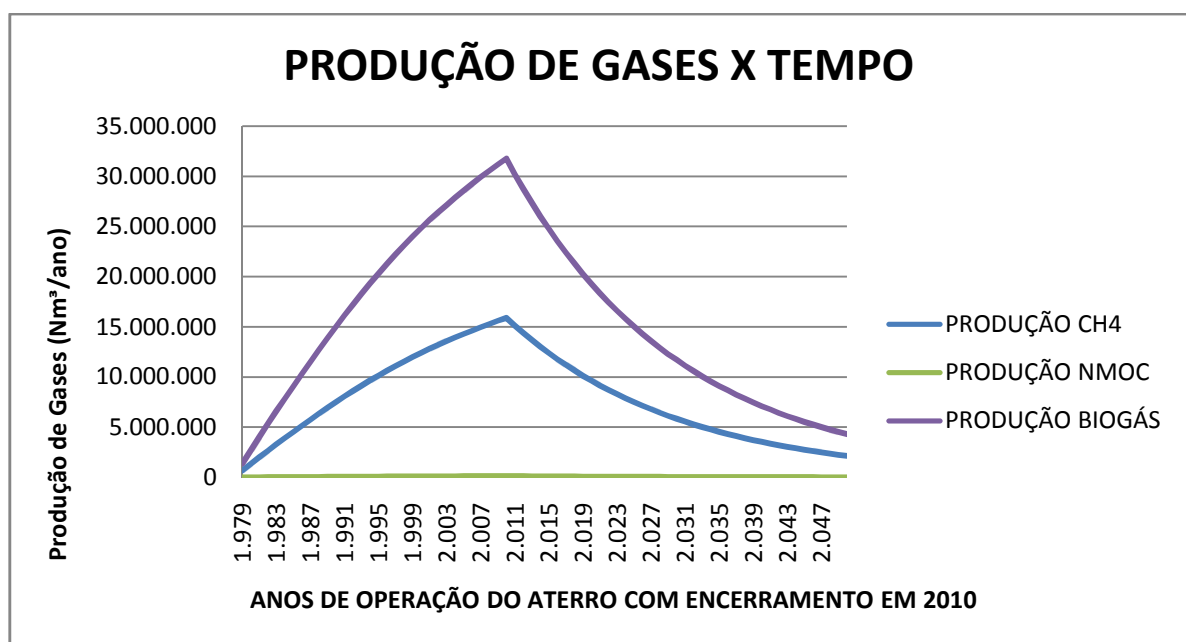


Figura 4.3: Evolução da produção de gases ao longo do tempo por meio da aplicação do software Landgem 3.02 para o aterro controlado de Londrina

4.6. Aplicação do modelo de primeira ordem adotado pelo IPCC para estimar a produção de biogás no aterro controlado de Londrina

Conforme apresentado no capítulo III, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) apresenta alguns métodos para estimar as emissões de gases em aterros. Para avaliar a geração de gases no aterro de Londrina, adotou-se o modelo de primeira ordem sugerido pela entidade.

Inicialmente definiram-se as variáveis de entrada na equação matemática. Os dados admitidos para o aterro de Londrina foram os mesmos utilizados nos outros modelos

(quantidade média dos RSD depositados e tempo de operação do aterro). Os outros parâmetros necessários à aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC (1996) foram adotados conforme a sugestão da própria entidade e são a seguir relacionados:

- Ano de realização do inventário: $t = 2010$
- Anos de contribuição desde o início das atividades: $x = 32$ anos (desde 1979)
- Constante de geração: $k = 0,05 \text{ anos}^{-1}$
- Resíduos sólidos gerados no ano “ x ”: $RSU_T(x) = (\text{quadro 4.1})$
- Fração de resíduos depositada no aterro no ano “ x ”: $1,0$ (100%)
- Fator de correção de metano no ano “ x ”: $FCM(x) = 1$
- Fração de carbono orgânico degradável no ano “ x ”: $COD(x) = 0,12$ (ton. C/ton. RSD)
- Fração de carbono orgânico degradável assimilada: $COD_f = 0,77$
- Fração de metano no gás do aterro: $F = 0,5$
- Conversão de carbono a metano: $16/12$
- Quantidade de metano recuperada no ano “ t ”: $R(t) = 0$
- Fator de oxidação do metano: $OX = 0$

O potencial de geração de metano foi calculado a partir da equação 3.9.

$$L_o = FCM * COD * COD_f * F * (16/12) * (1000 / 0,716)$$

$$L_o = 85,91 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. RSD}$$

O fator de normalização para corrigir a soma foi dado pela equação:

$$A = (1 - e^{-k}) / k$$

$$A = 0,975$$

A formulação utilizada para calcular a geração de gás metano no aterro foi a equação 3.12.

$$CH_{4gerado} = \sum_{i=1}^t (A \cdot k \cdot RSD_T(x) \cdot RSD_f(x) \cdot L_o \cdot e^{(-k \cdot (t-x))}) \quad (\text{Equação 3.12})$$

Onde:

$CH_{4gerado}$ = geração de gás metano no ano (ton. de CH_4 /ano)

RSD_T = total de resíduos gerados pela população no ano “ x ” (ton. de resíduo/ano)

RSD_T = População * Taxa de RSD por habitante (toneladas)

RSD_f = fração de resíduos sólidos efetivamente depositada no aterro no ano “ x ” (%)

L_o = potencial de geração de metano calculado pela equação 3.9 (ton. CH_4 /ton. resíduo)

$A = (1 - e^{-k})/k$; fator de normalização para corrigir a soma

k = taxa de geração de metano (ano⁻¹)

e = base logarítmica (sem unidade)

t = ano de realização do inventário

x = ano de contribuição desde o início das atividades do aterro até o ano "t"

O modelo sugerido pelo IPCC apresenta ainda uma formulação específica para calcular o gás metano emitido pelo aterro, considerando que possa haver recuperação de gás metano e avaliando, também, que existe um fator de oxidação do gás metano gerado quando atravessa as camadas superficiais do aterro. No caso do aterro controlado de Londrina, considerou-se que não existe recuperação de gás metano e que, na ausência de dados de campo, o fator de oxidação foi estimado como sendo nulo. Sabe-se previamente que este valor não é zero, mas seguiu-se a orientação do IPCC para o caso da não existência desses dados. Em pesquisas futuras realizadas no aterro de Londrina os parâmetros em questão poderão ser avaliados.

$$CH_{4\text{emitido}} = \left((CH_{4\text{gerado}}) - R(t) \right) \cdot (1 - OX) \quad \text{(Equação 3.13)}$$

Onde:

$CH_{4\text{emitido}}$ = gás metano emitido para a atmosfera no ano (ton. de CH_4 /ano)

$CH_{4\text{gerado}}$ = geração de gás metano no ano (ton. de CH_4 /ano)

$R(t)$ = quantidade de metano recuperada no ano em questão (nula)

OX = fator de oxidação (fração nula)

O quadro 4.12 apresenta a geração de gás metano durante todos os anos de operação do aterro, calculada pelo modelo do IPCC.

Quadro 4.12: Cálculo da produção de gás metano para o aterro controlado de Londrina obtida com a aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC

PRODUÇÃO DE GÁS METANO PARA O ATERRO DE LONDRINA							
APLICAÇÃO DO MODELO DE PRIMEIRA ORDEM DO IPCC							
ANO	ANOS FUNCIONAMENTO	RSD DEPOSITADOS	TAXA GERAÇÃO DE GÁS METANO	FATOR DE NORMALIZAÇÃO	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE GÁS METANO (Lo)	GERAÇÃO ANUAL DE GÁS METANO	GERAÇÃO DE GÁS METANO ACUMULADA
	x (anos)	(ton/ano)	k (1/ano)	A	Nm ³ CH ₄ /ton. RSD	Nm ³ /ano	Nm ³ /ano
1979	1	82.152	0,05	0,975	85,91	170.857	170.857
1980	2	84.701	0,05	0,975	85,91	185.189	356.046
1981	3	87.249	0,05	0,975	85,91	200.541	556.587
1982	4	89.798	0,05	0,975	85,91	216.981	773.567
1983	5	92.346	0,05	0,975	85,91	234.579	1.008.146
1984	6	94.894	0,05	0,975	85,91	253.411	1.261.557
1985	7	97.443	0,05	0,975	85,91	273.558	1.535.115
1986	8	99.991	0,05	0,975	85,91	295.105	1.830.220
1987	9	102.539	0,05	0,975	85,91	318.142	2.148.362
1988	10	105.088	0,05	0,975	85,91	342.765	2.491.127
1989	11	107.636	0,05	0,975	85,91	369.077	2.860.204
1990	12	110.184	0,05	0,975	85,91	397.185	3.257.389
1991	13	111.463	0,05	0,975	85,91	422.397	3.679.787
1992	14	112.743	0,05	0,975	85,91	449.151	4.128.937
1993	15	114.022	0,05	0,975	85,91	477.537	4.606.474
1994	16	115.301	0,05	0,975	85,91	507.653	5.114.127
1995	17	116.581	0,05	0,975	85,91	539.602	5.653.730
1996	18	117.860	0,05	0,975	85,91	573.493	6.227.223
1997	19	119.140	0,05	0,975	85,91	609.444	6.836.667
1998	20	119.670	0,05	0,975	85,91	643.540	7.480.207
1999	21	120.199	0,05	0,975	85,91	679.531	8.159.737
2000	22	120.729	0,05	0,975	85,91	717.520	8.877.258
2001	23	121.259	0,05	0,975	85,91	757.619	9.634.877
2002	24	121.789	0,05	0,975	85,91	799.944	10.434.821
2003	25	122.319	0,05	0,975	85,91	844.617	11.279.438
2004	26	122.850	0,05	0,975	85,91	891.775	12.171.213
2005	27	123.667	0,05	0,975	85,91	943.729	13.114.942
2006	28	124.483	0,05	0,975	85,91	998.666	14.113.608
2007	29	125.300	0,05	0,975	85,91	1.056.755	15.170.363
2008	30	126.116	0,05	0,975	85,91	1.118.176	16.288.539
2009	31	126.933	0,05	0,975	85,91	1.183.118	17.300.800
2010	32	127.750	0,05	0,975	85,91	1.251.784	18.723.441
2011	32	0	0,05	0,975	85,91	0	18.723.441
2012	32	0	0,05	0,975	85,91	0	18.723.441
2013	32	0	0,05	0,975	85,91	0	18.723.441
2014	32	0	0,05	0,975	85,91	0	18.723.441
2015	32	0	0,05	0,975	85,91	0	18.723.441

O comportamento gráfico do modelo matemático sugeriu um crescimento exponencial da produção de gás metano, partindo do ano 1979 e alcançando maximização no ano 2010. O valor máximo de gás metano gerado aconteceu no ano do fechamento do aterro, com o valor de 18.723.441 Nm³/ano. O modelo considerou que a produção de gás metano sofre estagnação após a interrupção da entrada de RSD.

A figura 4.4 apresenta o crescimento exponencial da produção de gás metano ao longo dos anos de operação, com valor máximo no ano de 2010.

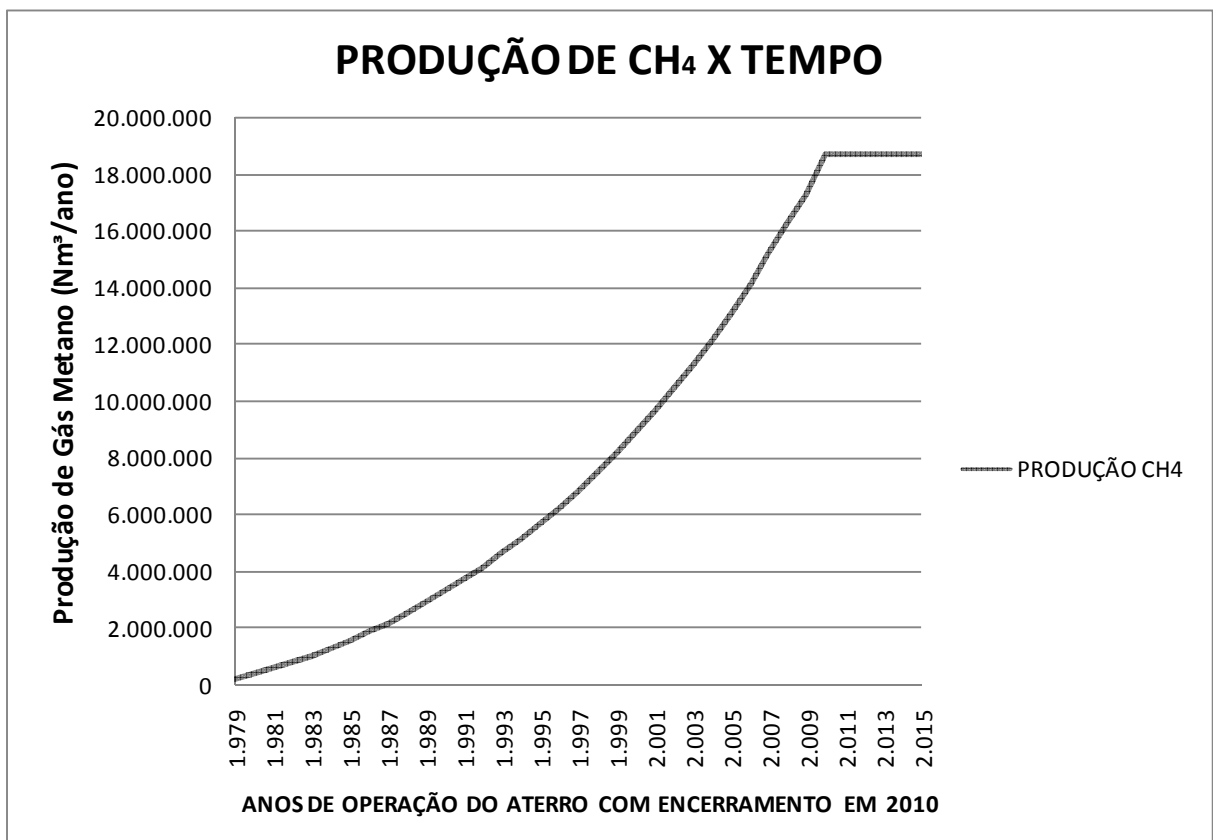


Figura 4.4: Evolução da produção de gás metano ao longo do tempo a partir do modelo de primeira ordem do IPCC para o aterro controlado de Londrina

A aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC (1996) considerou que a fração de gás metano presente no biogás do aterro foi de 50% ($F=0,5$). A estimativa do volume de gás carbônico foi realizada utilizando o critério da igualdade em volume dos dois gases principais na composição do biogás, avaliando assim 18.723.441 Nm³/ano. O volume estimado de biogás produzido no ano de 2010 foi de 37.446.882 Nm³/ano para o aterro controlado de Londrina.

4.7. Medidas experimentais da emissão de gases no aterro controlado de Londrina

4.7.1. Resultados obtidos na primeira campanha de medidas

Os experimentos realizados na primeira campanha de medidas tiveram como objetivo a caracterização preliminar das emissões de gases em fuga no aterro de Londrina. Para tal, foram feitos ensaios sobre a camada de cobertura do aterro, abaixo da camada de cobertura no contato solo-resíduo e nos drenos de biogás existentes na ocasião.

Para avaliar a emissão de gases na superfície do aterro, foram realizados cinco ensaios com placa estática de fluxo, nomeados EP-01 a EP-05. O gás aprisionado no ambiente interno da placa variou em volume conforme o decorrer do tempo. O tempo base de interrupção do ensaio foi de 30 minutos para minimizar os efeitos do aumento de pressão, concentração e temperatura dentro do compartimento da placa de fluxo. Os resultados obtidos são apresentados na figura 4.5, onde se mostram as curvas a partir dos dados colhidos em campo, com leituras de 5 em 5 minutos, aproximadamente. A unidade de medida utilizada para quantificação do volume de gás metano na elaboração do gráfico é NLitro, resultando uma percolação superficial em NL/h.m². O quadro 4.13 exhibe os resultados em valores dos ensaios com as placas de fluxo.

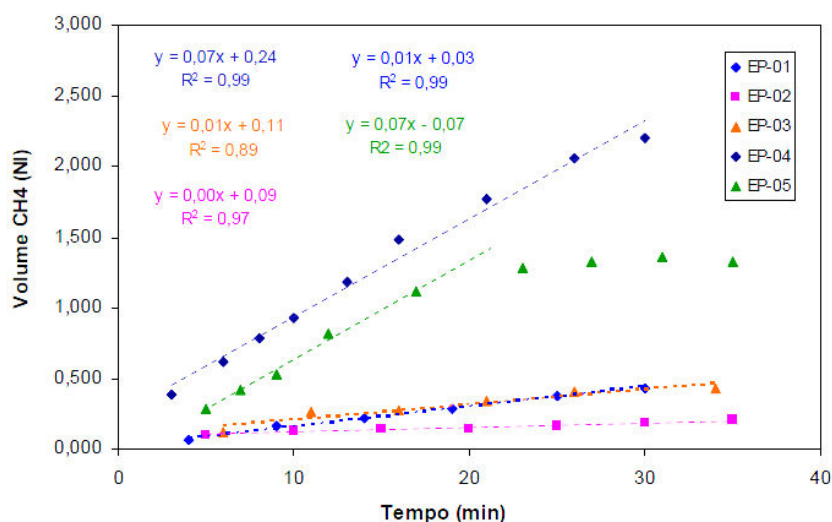


Figura 4.5: Variação do volume de CH₄ na placa estática de fluxo com o tempo

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

Quadro 4.13: Resultados obtidos nos ensaios com placa de fluxo na primeira campanha de medidas

Ensaio	Emissão Superficial de CH ₄ (NL/h.m ²)	Concentração sob cobertura (%)			Espessura da camada (m)	Pressão sob cobertura (Pa)	Pressão interna (Pa)		Variação temperatura interna (°C)
		CH ₄	CO ₂	O ₂			Mín.	Máx.	
EP-01	5,8	42,0	32,5	4,5	0,60	2640,0	-117,0	8,0	0,4
EP-02	1,3	40,0	50,0	0,6	0,35	1803,0	-19,0	0,0	1,7
EP-03	5,5	13,0	27,5	11,5	1,00	470,0	-176,0	3,0	0,6
EP-04	30,6	2,0	1,4	19,6	0,45	3200,0	-6,0	0,0	0,4
EP-05	26,4	28,0	37,0	5,8	0,25	9,0	6,0	9,0	0,3

Obs: os ensaios EP-01, EP-03, EP-04 e EP-05 foram realizados em cima de bolhas que escapavam pela camada de cobertura

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

Os resultados mostrados apresentaram valores com variabilidade entre 1,3 a 30,6 NL/h.m², e média geral de 13,9 NL/h.m². Em termos de vazão mássica, a média se mostra com o valor de 238,3 g/dia.m², valor elevado segundo a literatura. A camada de cobertura do aterro de Londrina apresentava-se bastante úmida devido às fortes chuvas que ocorreram na ocasião da campanha. Por esse motivo foi possível visualizar bolhas de gás em vários pontos, um indicativo visual da percolação dos gases de forma descontrolada. A umidade da camada de cobertura determinada em laboratório para as amostras de solo coletadas variou entre 32,5% e 35,4%.

O solo da camada superficial apresentou densidade variando entre 1,43 a 1,53 g/cm³, com percentual de finos superior a 90%. Como parâmetro preliminar, a presença de silte e/ou argila em grande quantidade indicada no percentual de finos do solo da camada de cobertura é um elemento de auxílio para a impermeabilização do aterro. Uma análise mais acurada poderia levar em consideração dados de permeabilidade, granulometria e expansividade. O quadro 4.14 mostra os resultados dos ensaios realizados no solo da camada de cobertura do aterro de Londrina.

Quadro 4.14: Resultados dos ensaios com placa de fluxo e parâmetros do solo da camada de cobertura do aterro de Londrina

Ensaio	Emissão Superficial de CH ₄ (NL/h.m ²)	Densidade úmida do solo (g/cm ³)	Teor de umidade do solo (%)	Densidade seca (g/cm ³)	% de finos do solo (peneira n°. 200)
EP-01	5,8	2,03	32,5	1,53	90,8
EP-02	1,3	2,01	33,3	1,51	92,5
EP-03	5,5	1,93	35,4	1,43	93,4
EP-04	30,6	1,94	33,7	1,45	90,6
EP-05	26,4	2,03	33,4	1,52	89,9

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

A análise dos gases existentes sob a camada de cobertura do aterro foi realizada por meio de dez ensaios com tubos de inspeção, nomeados T-01 a T-10. Foram coletados dados de concentração de CH₄, CO₂, O₂ e H₂S, bem como as espessuras da camada de cobertura em cada ponto. A concentração de CH₄ variou de 2,1% a 42% (média de 16,3%), a de CO₂ variou de 0,8% a 50% (média de 17,1%) e a de O₂ entre 0,6% a 19,7% (média de 12,9%). A presença de O₂ em grande quantidade sob a camada de solo teve como provável motivo a percolação de águas pluviais, carreando oxigênio dissolvido e inibindo a degradação anaeróbica, fato que pode ser constatado pela baixa taxa de CH₄. O quadro 4.15 apresenta os resultados dos ensaios com tubos de inspeção.

Quadro 4.15: Resultados dos ensaios com tubos de inspeção abaixo da camada de cobertura do aterro de Londrina

Ensaio	Concentração sob cobertura (%)				Espessura da camada (m)	Pressão sob cobertura (Pa)	Observações
	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S*			
T-01	42,0	32,5	4,5	28	0,60	2.640,0	Presença de líquidos no tubo
T-02	40,0	50,0	0,6	12	0,35	1.803,0	Presença de líquidos no tubo
T-03	13,0	27,5	11,5	0	1,00	470,0	Presença de líquidos no tubo
T-04	2,0	1,4	19,6	0	0,45	3.200,0	Presença de líquidos no tubo
T-05	28,0	37,0	5,8	5	0,25	9,0	Não detectado líquidos
T-06	5,0	3,6	18,6	0	0,60	2.500,0	Presença de líquidos no tubo
T-07	12,6	8,0	15,6	0	0,25	0,0	Não detectado líquidos
T-08	2,1	0,8	19,7	0	0,45	1.167,0	Presença de líquidos no tubo
T-09	10,2	3,8	16,0	0	0,55	0,0	Não detectado líquidos
T-10	8,2	6,0	17,4	0	0,30	470,0	Presença de líquidos no tubo

Observação: * concentração em ppm

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

A pressão média do biogás obtida sob a camada de cobertura foi 1.225 Pa. Essa pressão, considerada elevada, estava associada à grande quantidade de líquido sob a camada de cobertura, constatado em 70% dos furos realizados nesses ensaios. A presença de líquidos oriundos principalmente da infiltração de águas pluviais exercia pressão em todo o maciço de lixo sob a camada de cobertura do aterro controlado de Londrina. A espessura da camada de cobertura variou de 0,25m a 1,00m (média de 0,48m), um indicativo da necessidade de correção dos procedimentos operacionais para tornar a camada mais homogênea.

Com relação aos gases emitidos pelos drenos verticais, foram monitorados 12 drenos nomeados DV-01 a DV-12. Os drenos estavam localizados em partes distintas do aterro de Londrina, com idades diversas de deposição dos resíduos. O dreno DV-01 estava localizado próximo à Estrada do Limoeiro e à entrada do aterro, local que há vários anos não recebe mais resíduos sólidos. Os drenos DV-02 a DV-05 estavam localizados próximos ao local de deposição de resíduos por parte da operadora do aterro na ocasião da campanha de medidas. Os drenos DV-06 e DV-07 se localizavam sobre resíduos com idade de até 5 anos e os drenos DV-08 a DV-12 localizam-se em patamar inferior mais ao fundo do aterro, local que não recebe resíduos há mais de 5 anos contados da data da realização da primeira campanha de medidas. O quadro 4.16 resume os resultados das medidas realizadas nos drenos verticais de gases, com o valor calculado de biogás e de gás metano.

Quadro 4.16: Resumo dos resultados obtidos nos drenos verticais do aterro de Londrina

Dreno	Concentração de biogás (%)				Temperatura do biogás (°C)	Pressão atm (mbar)	Velocidade Média (m/s)			Veloc. Média (m/s)	Diâmetro interno do tubo (m)	Vazão de biogás (Nm³/h)	Vazão de CH ₄ (Nm³/h)
	CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S*			1	2	3				
DV-01	10,4	5,2	10,2	0,0	17,0	951,8	inexistente			**	0,080	**	**
DV-02	19,0	15,5	12,5	28,0	27,3	951,8	1,2	1,2	1,3	1,23	0,073	20,20	3,80
DV-03	dreno não investigado por estar queimando durante toda campanha												
DV-04	50,0	40,0	0,4	34,0	27,0	950,7	1,7	1,6	1,5	1,60	0,073	26,20	13,10
DV-05	50,0	38,0	0,3	29,0	32,5	950,7	1,0	1,6	1,4	1,33	0,073	21,50	10,70
DV-06	2,4	1,2	19,7	2,0	23,4	950,7	0,3	0,7	0,4	0,47***	0,500	***	***
DV-07	38,0	27,0	6,5	49,0	34,1	950,7	0,6	0,8	0,6	0,67	0,500	500,60	190,20
DV-08	54,0	36,0	0,8	60,0	40,5	950,7	3,5	3,8	3,6	3,63	0,080	68,40	36,90
DV-09	0,7	0,4	20,0	0,0	23,6	950,7	0,3	0,3	0,3	0,30	0,080	6,00	0,00
DV-10	52,0	33,0	1,0	3,0	28,0	950,7	1,3	0,9	0,9	1,03	0,080	20,30	10,50
DV-11	49,0	29,0	2,0	3,0	31,3	950,7	0,5	0,8	0,9	0,73	0,080	14,20	7,00
DV-12	54,0	35,0	0,6	94,0	40,9	950,7	1,6	2,2	2,2	2,00	0,080	37,60	20,30
Observação:	* concentração em ppm										SOMA	715,00	292,50
	** não detectado fluxo de gás com o equipamento cujo limite inferior é 0,2 m/s												
	*** não foi considerada esta determinação pois aparentemente o fluxo estava no sentido inverso influenciado pelo vento. Não foi possível fazer a medição corretamente por conta da altura do dreno (superior a 2,5m)												

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

A vazão de CH₄ nos drenos variou de 0 a 190,2 Nm³/h, mostrando diversidade de idades de deposição de resíduos sólidos e, possivelmente, entupimento de alguns drenos. A vazão máxima foi verificada no DV-07, posicionado na parte posterior do aterro de Londrina e construído em tubo de concreto com diâmetro de 500 mm. Os drenos adaptados com tubos metálicos de 73 e 80 mm apresentaram vazões inferiores (entre 0 e 36,9 Nm³/h). Provavelmente, os resultados destes drenos foram influenciados pelo estrangulamento da seção superior do dreno e pela ausência de impermeabilização no entorno do dreno.

De modo geral, a concentração de CH₄ variou de 0,7% a 54%. O dreno DV-01 não apresentou leitura considerável por provável entupimento. O dreno DV-03 não pode ser investigado por se apresentar queimando durante toda a campanha. Os drenos DV-02, DV-06 e DV-09 apresentaram leituras pequenas de concentração, incompatíveis com a idade dos resíduos depositados. O dreno DV-02 estava próximo dos resíduos descarregados pelos caminhões na ocasião da campanha, o que pode ter influenciado o baixo desempenho. Os drenos DV-04, DV-05, DV-07, DV-08, DV-10, DV-11 e DV-12 apresentaram resultados de composição do biogás típicas da fase metanogênica.

A temperatura do biogás nos drenos variou de 17°C a 40,9°C. Apesar do pequeno número de ensaios realizados, foi possível observar relação direta da temperatura com a concentração e vazão do CH₄ no biogás. A figura 4.6 exibe a relação entre a temperatura do gás metano e a concentração do mesmo no biogás.

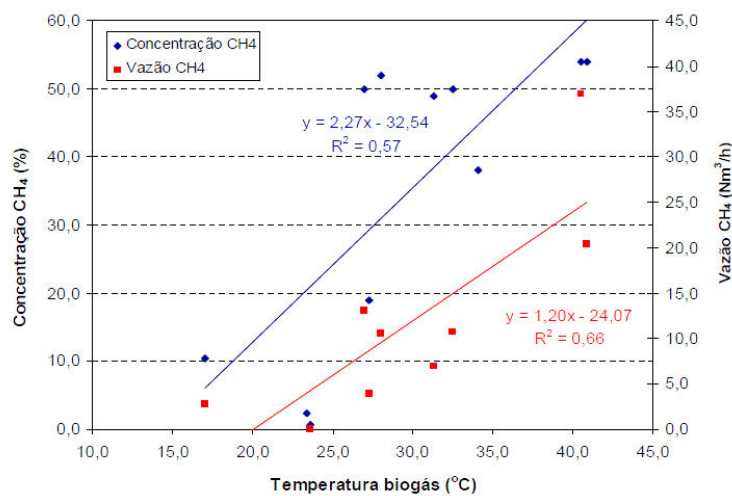


Figura 4.6: Relação da temperatura do biogás com a concentração e vazão de CH₄ no aterro controlado de Londrina

Fonte: MACIEL *et al* (2009)

Não obstante o limite amostral da primeira campanha de medidas foi possível uma verificação preliminar da emissão total de gás metano no aterro controlado de Londrina. Partindo-se dos parâmetros apresentados na metodologia, compôs-se o levantamento das vazões em cada uma das três áreas parceladas especialmente para a primeira campanha, de modo a obter a vazão total de gás metano no aterro.

O quadro 4.17 apresenta os resultados da quantificação de gás metano no aterro de Londrina, com valores obtidos dos ensaios da primeira campanha. Mostra separadamente os resultados obtidos na superfície e nos drenos verticais existentes na ocasião da primeira campanha de medidas.

Quadro 4.17: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais do aterro controlado de Londrina na primeira campanha de medidas

EMIÇÃO DE GÁS METANO DETECTADA NOS ENSAIOS DE PLACA E MEDIÇÃO DE DRENOS - PRIMEIRA CAMPANHA												
ÁREAS DO ATERRO	ÁREA 1 (42.809 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 1 ANO			ÁREA 2 (55.328 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 5 ANOS			ÁREA 3 (49.852 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS HÁ MAIS DE 5 ANOS			Emissão total na superfície	Emissão total nos drenos	EMIÇÃO TOTAL NO ATERRO
ENSAIOS COM PLACA DE FLUXO	Média de emissão de CH ₄ - método IQD** (NL/m ² .h)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na área 1 (Nm ³ /ano)	Média de emissão de CH ₄ - média*** simples (NL/m ² .h)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na área 2 (Nm ³ /ano)	Média de emissão de CH ₄ (NL/m ² .h)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na área 3 (Nm ³ /ano)	Emissão anual na superfície (Nm ³ /ano)		Emissão anual total (Nm ³ /ano)
EP-01	5,8	50,81		*	*		*					
EP-02	1,3	11,39		*	*		*					
EP-03	*	*		5,5	48,18		*					
EP-04	*	*		30,6	268,06		*					
EP-05	26,4	231,26		*	*		*					
EMIÇÕES SUPERFICIAIS	14,75	129,18	5.530.067	18,05	158,12	8.748.463	*	*	*	14.278.530		
MEDIÇÕES EM DRENOS VERTICAIS	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)		Emissão anual na área 1 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)		Emissão anual na área 2 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)		Emissão anual na área 3 (Nm ³ /ano)		Emissão anual nos drenos (Nm ³ /ano)	
DV-01	0,0			*			*					
DV-02	3,8			*			*					
DV-03	dreno não investigado na ocasião											
DV-04	13,1			*			*					
DV-05	10,7			*			*					
DV-06	*			0,0			*					
DV-07	*			190,2			*					
DV-08	*			*			36,9					
DV-09	*			*			0,0					
DV-10	*			*			10,5					
DV-11	*			*			7,0					
DV-12	*			*			20,3					
EMIÇÕES POR DRENOS	27,6		241.776	190,2		1.666.152	74,7		654.372		2.562.300	16.840.830
Observações:	* leituras não realizadas na área em questão											
	**IQD - Inverso do Quadrado da Distância (método de interpolação)											
	***na área 2 a média considerada foi a aritmética por só haver dois dados amostrais.											

A emissão total de gás metano considerada para o aterro de Londrina foi calculada pela soma das emissões superficiais com as emissões originadas nos drenos verticais, perfazendo 16.840.830 Nm³/ano.

Os ensaios para caracterização do biogás gerado no aterro de Londrina foram executados em curto período de tempo (2 dias) e serviram para avaliar preliminarmente a emissão dos gases na camada de cobertura e nos drenos existentes.

Constatou-se visualmente e experimentalmente, que existia grande fuga de biogás pela superfície do aterro. Essa fuga do biogás indicava deficiências na operação da camada de cobertura, o que foi verificado pelas diferenças existentes na espessura da camada. A composição do biogás sugeriu que grande parte dos RSD depositados atende às características da fase metanogênica de biodegradação.

Com relação aos drenos verticais, observou-se que não eram suficientes para coletar o biogás gerado no aterro de Londrina, perfazendo uma vazão total de 15,2% do total quantificado para a emissão do aterro. Verificou-se que o estrangulamento para instalação do queimador na extremidade do dreno pode incrementar perda de carga à drenagem do biogás, não sendo constatada impermeabilização na superfície nas proximidades do dreno.

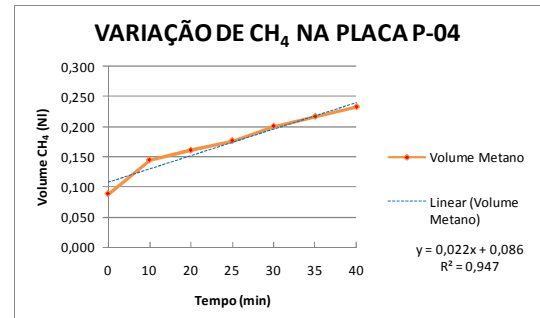
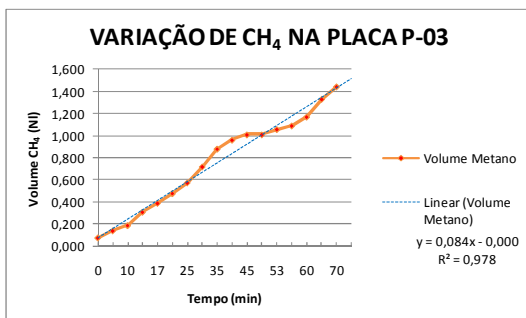
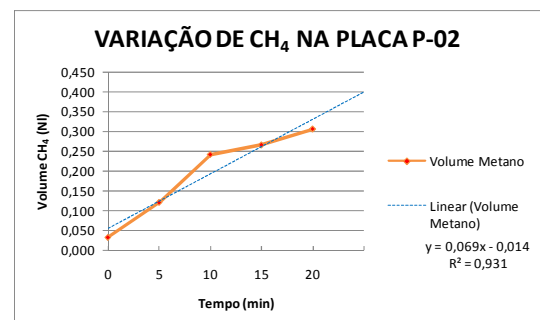
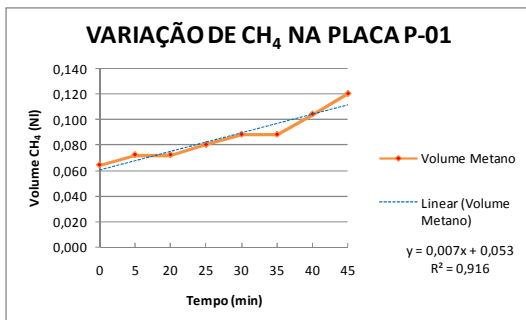
Devido à ausência de dados relativos às emissões de gás carbônico na primeira campanha de medidas, sua quantificação foi estimada com base na quantificação de gás metano, considerando que o volume de gás carbônico emitido fosse igual ao do gás metano. Na segunda e terceira campanhas de medidas essa quantificação se fez repetindo os procedimentos matemáticos realizados para o gás metano.

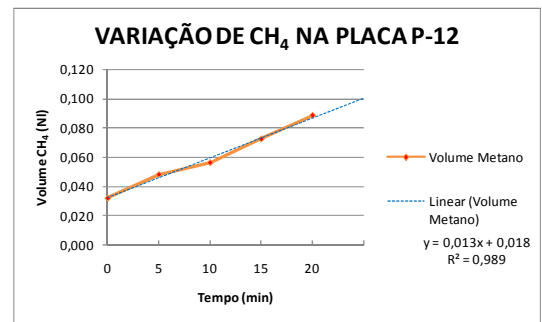
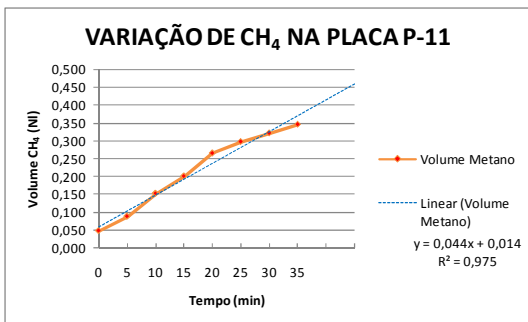
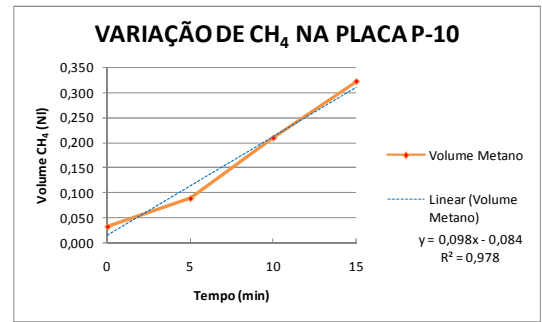
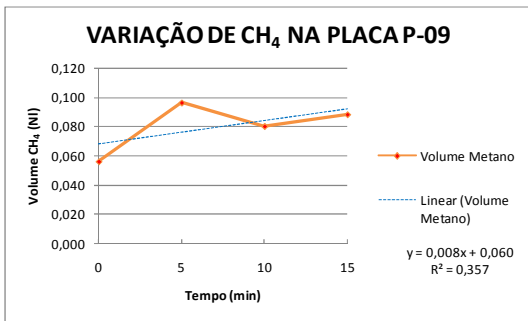
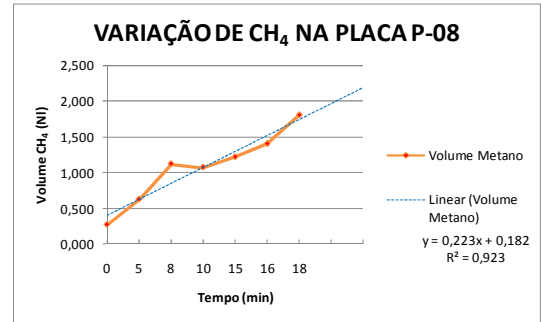
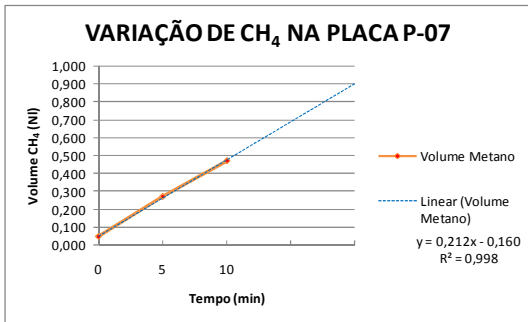
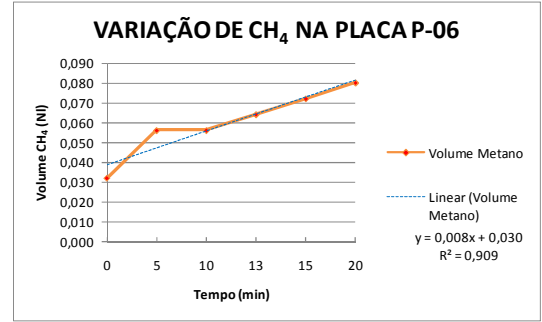
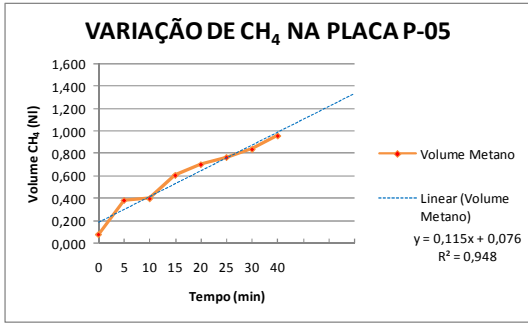
O volume avaliado para a emissão de gás carbônico na primeira campanha de medidas foi de 16.840.830 Nm³/ano. A estimativa da emissão de biogás foi de 33.681.660 Nm³/ano, considerando que os outros gases que compõem o biogás são secundários em termos quantitativos.

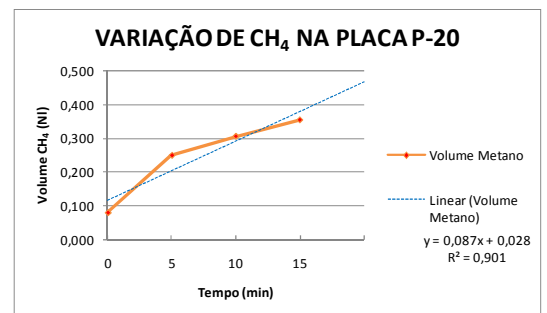
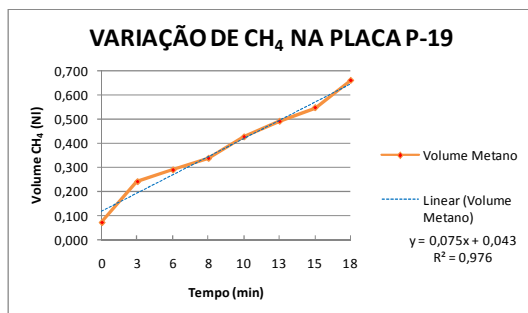
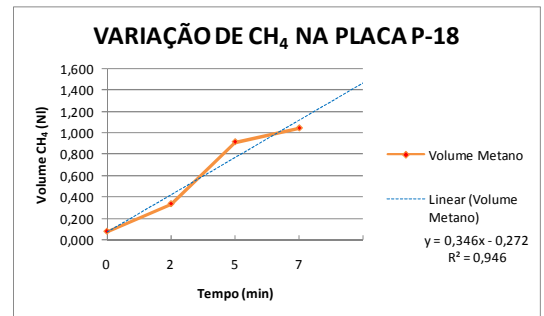
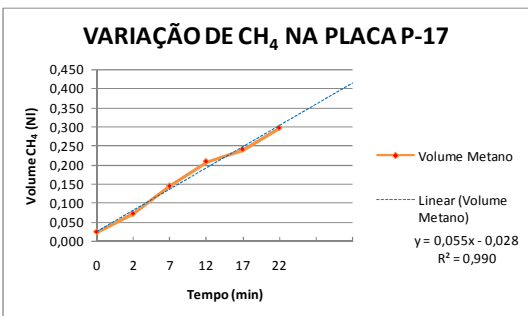
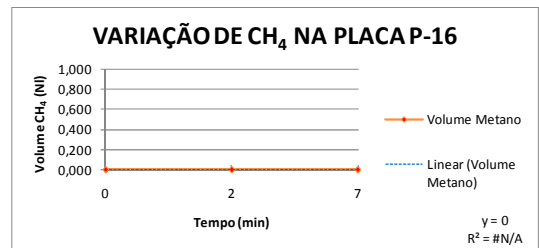
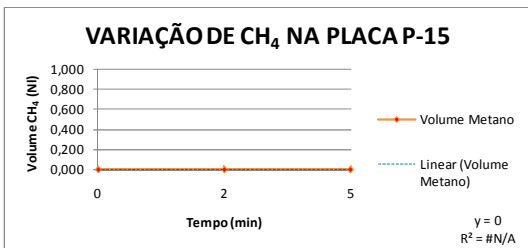
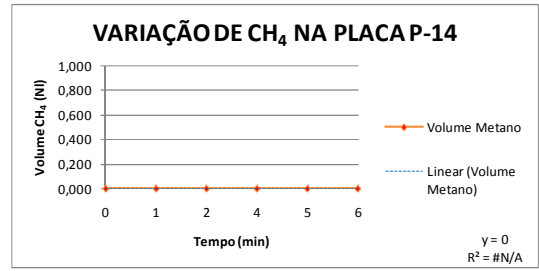
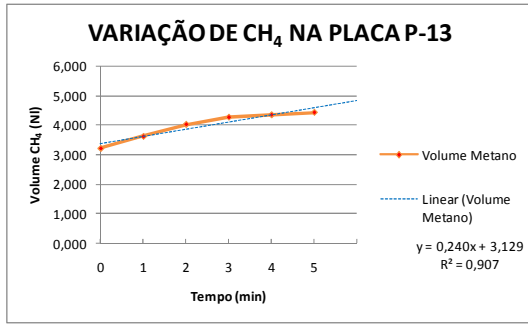
4.7.2. Resultados obtidos na segunda campanha de medidas

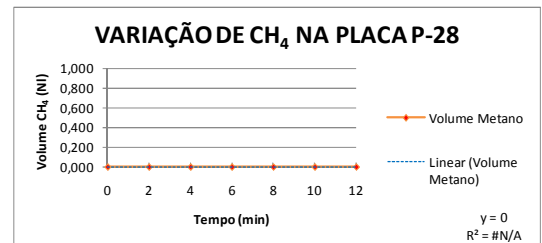
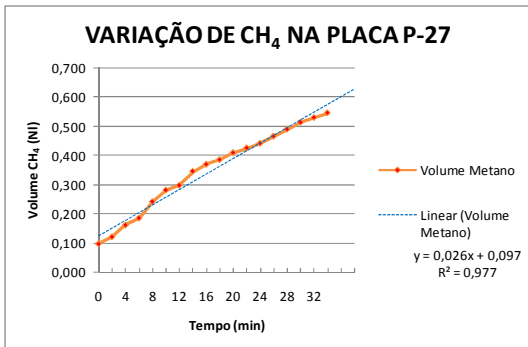
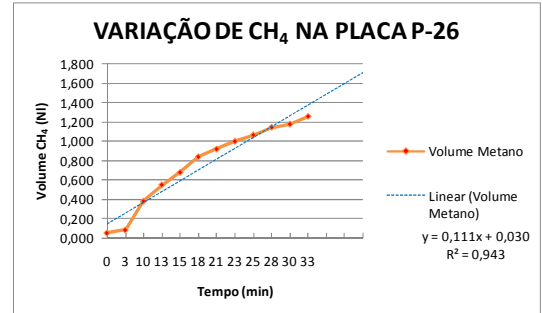
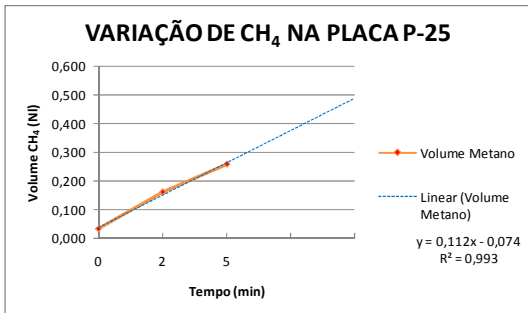
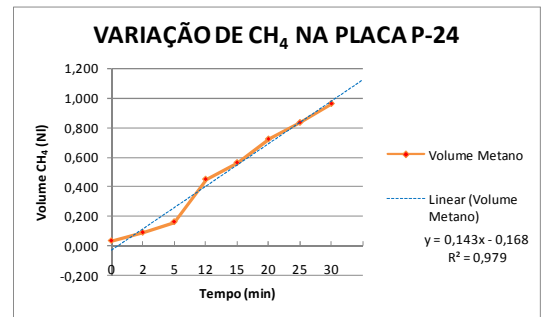
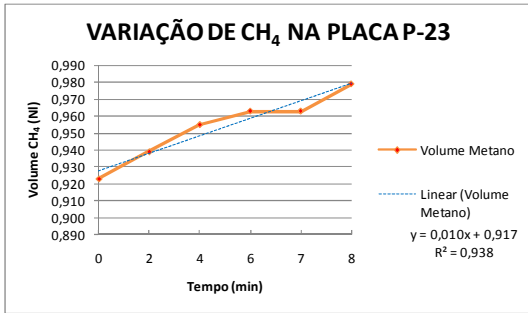
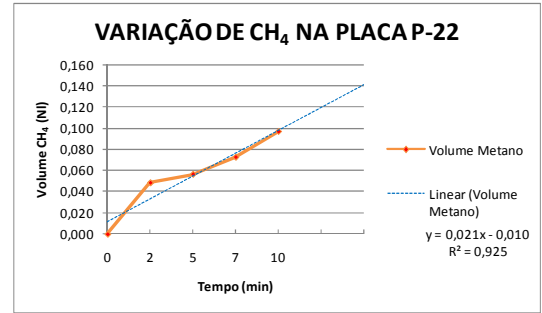
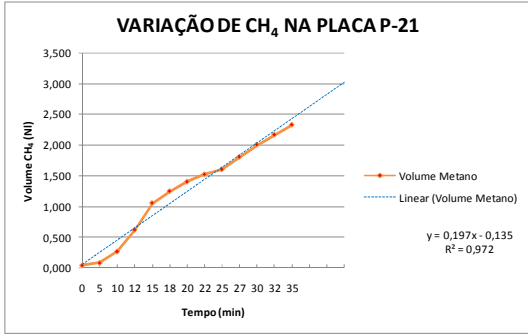
Na segunda campanha de medidas foram realizados 31 ensaios com placa estática de fluxo na superfície do aterro controlado de Londrina, nomeados P-01 a P-31. O tempo de duração de cada ensaio sofreu variação, dependendo das características da emissão de biogás no local. De forma geral, as leituras foram efetuadas em intervalos entre um e cinco minutos. O maior tempo de ensaio foi de 75 minutos e o menor tempo foi de 5 minutos. Este último ensaio foi realizado em um ponto de vazão excessivamente elevada.

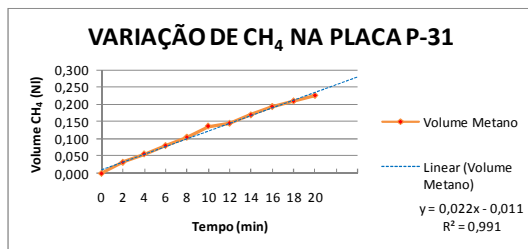
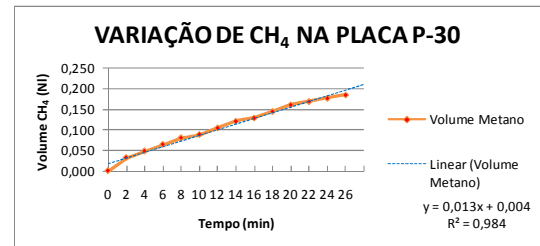
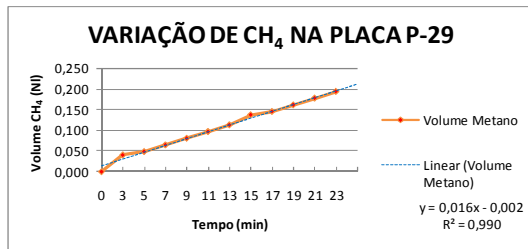
Após tratamento dos dados colhidos em campo, conforme metodologia apresentada no capítulo III, os resultados obtidos em cada ensaio com placa de fluxo foram transferidos para gráficos. As figuras 4.7 mostram a evolução do volume de gás metano no ambiente interno da placa estática de fluxo, a partir dos dados colhidos no aterro de Londrina. A unidade de medida utilizada para quantificação do volume de gás metano na elaboração do gráfico é o NLitro, resultando uma percolação superficial em NL/h.m².











Figuras 4.7: Variação do volume de gás metano ao longo do tempo nos ensaios com placa estática de fluxo na segunda campanha de medidas

Os gráficos exibidos são construídos tendo no eixo das ordenadas o volume de gás metano armazenado dentro da placa de fluxo e, no eixo das abscissas, o tempo transcorrido para acumulação da quantidade de gás no interior da placa. O comportamento do fenômeno foi interpretado por meio da adaptação de uma equação de reta, considerando os pontos do ensaio enquanto há uma relação próxima à linearidade entre a quantidade de gás metano emitida pela superfície do aterro e o tempo transcorrido.

Os ensaios P-03, P-07, P-10, P-11, P-12, P-17, P-19, P-21, P-24, P-25, P-27, P-29, P-30 e P-31 apresentaram coeficientes de correlação acima de 95%, indicando forte tendência de linearidade na interpretação do fenômeno. Os ensaios P-01, P-02, P-04, P-05, P-06, P-08, P-13, P-18, P-20, P-22, P-23 e P-26 apresentaram coeficientes de correlação entre 90% e 95%, também indicando alta correlação entre as variáveis volume de gás metano emitido e tempo necessário à emissão. O ensaio P-09 apresentou valor para o coeficiente de correlação abaixo de 90%, motivado possivelmente pelo baixo número de pontos tomados em campo e por possíveis imprecisões nos tempos de leitura. Os ensaios P-14, P-15, P-16 e P-28 apresentaram emissão de biogás através da camada de superfície sem a presença de gás metano.

Com relação à quantidade de metano armazenada dentro do ambiente interno da placa de fluxo no decorrer do tempo, os ensaios de placa de fluxo nomeados P-03, P-08, P-13, P-18, P-21, P-24 e P-26 apresentaram valores máximos de gás metano acumulado maiores que 1 NL. Os ensaios P-05, P-19, P-23, P-24 e P-27 mostraram valores máximos de gás metano acumulados entre 0,5 NL e 1 NL no tempo transcorrido para o ensaio. A maioria dos ensaios, quais sejam, P-01, P-02, P-04, P-07, P-10, P-11, P-17, P-20, P-22, P-25, P-29, P-30 e P-31, apresentaram valores de gás metano acumulado entre 0,1 NL e 0,5 NL no tempo máximo do ensaio. Os ensaios P-06, P-09 e P-12 apresentaram valores acumulados de gás metano abaixo de 0,1 NL.

Para a análise do tempo transcorrido em cada ensaio de placa de fluxo realizado na camada de cobertura do aterro de Londrina, observou-se intervalo de variação entre 5 minutos e 75 minutos. Os ensaios P-02, P-06, P-07, P-08, P-09, P-10, P-12, P-13, P-14, P-15, P-16, P-17, P-18, P-19, P-20, P-22, P-23, P-25, P-28, P-29, P-30 e P-31 foram realizados em períodos inferiores a 30 minutos. Os ensaios P-01, P-04, P-05, P-11, P-21, P-24, P-26 e P-27 foram realizados em períodos de 30 a 60 minutos e o ensaio P-03 teve duração de 70 minutos. O parâmetro mais utilizado para paralisação dos ensaios foi a tendência à estabilização da quantidade de metano no ambiente interno da placa. O dado era observado quando ocorria a repetição de uma ou mais vezes na leitura do volume de gás metano, detectada pelo medidor de gases Draeger X-am 7000.

O volume de gás metano obtido no ensaio P-13 foi excessivamente alto para uma emissão superficial, com valor acumulado em volume superior a 4 NL no tempo de apenas 5 minutos. As informações dos funcionários da operadora do aterro se mostraram pouco precisas, mas cogitou-se a possibilidade de ter sido aterrado um antigo dreno de gás no local.

O quadro 4.18 mostra o resumo dos resultados obtidos para a emissão de gás metano nos ensaios com placa de fluxo realizados no aterro controlado de Londrina. Desconsiderando o ensaio P-13 por apresentar valores de fluxo de gás metano excessivamente elevados, os valores variaram entre 0,88 NL/h.m² a 48,24 NL/h.m², com média de 10,24 NL/h.m². A média geral representa, em termos de vazão mássica, 175,5 g/dia.m², valor consentâneo com a amplitude de resultados obtidos para aterros do Brasil e abaixo da média geral obtida na primeira campanha de medidas.

Quadro 4.18: Resultados calculados para os ensaios com placa de fluxo na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

RESULTADOS DOS ENSAIOS COM PLACA DE FLUXO - SEGUNDA CAMPANHA										
Ensaio	Pressão Atm.	Temp. t _{máx} do Ensaio	Dens. CH ₄ na temp. (t)	Porc. máxima CH ₄ na Placa	Vol. da Placa de Fluxo	Quant. final de CH ₄ na Placa	Área da Placa de Fluxo	Tempo do Ensaio	Fluxo de CH ₄ em Massa e Volume	
	kPa	°C	g/m ³	%	m ³	g	m ²	min	g/s.m ²	NLitro/h.m ²
P01	96,7654	26	632,62	1,5	0,008	0,076	0,16	45	0,000176	0,88
P02	96,7654	27	630,52	3,4	0,008	0,172	0,16	25	0,001	5,02
P03	96,7654	39	606,28	18	0,008	0,873	0,16	75	0,0013	6,53
P04	96,7654	34	616,15	18,9	0,008	0,932	0,16	40	0,00037	1,87
P05	96,4987	37	608,50	11,8	0,008	0,574	0,16	50	0,00152	7,62
P06	96,4987	36	610,47	1	0,008	0,049	0,16	20	0,00025	1,28
P07	96,4987	33	616,46	5,2	0,008	0,256	0,16	15	0,00303	15,24
P08	96,4987	30	622,56	20,5	0,008	1,021	0,16	20	0,00648	32,61
P09	96,4987	28	626,69	1,1	0,008	0,055	0,16	15	0,00038	1,93
P10	96,4987	27	628,78	4	0,008	0,201	0,16	15	0,0014	7,03
P11	96,4987	24	635,13	3,4	0,008	0,173	0,16	40	0,00065	3,26
P12	96,7254	23	638,77	1,1	0,008	0,056	0,16	20	0,00029	1,47
P13	96,7254	26	632,36	55	0,008	2,782	0,16	5	0,07162	360,10
P14	96,7254	51	583,59	0	0,008	0,000	0,16	6	SEM FLUXO CH ₄	
P15	96,7254	33	617,90	0	0,008	0,000	0,16	5	SEM FLUXO CH ₄	
P16	96,7254	27	630,26	0	0,008	0,000	0,16	7	SEM FLUXO CH ₄	
P17	96,7254	28	628,16	4	0,008	0,201	0,16	27	0,00088	4,43
P18	96,7254	32	619,93	13	0,008	0,645	0,16	12	0,00959	48,24
P19	96,7254	31	621,97	8,2	0,008	0,408	0,16	18	0,00236	11,87
P20	96,7254	30	624,02	4,4	0,008	0,220	0,16	15	0,00153	7,67
P21	96,4587	23	637,01	26	0,008	1,325	0,16	45	0,0044	22,11
P22	96,4587	22	639,16	1,2	0,008	0,061	0,16	10	0,00064	3,21
P23	96,4587	47	589,25	12,2	0,008	0,575	0,16	8	0,00749	37,65
P24	96,4587	25	632,73	12,4	0,008	0,628	0,16	45	0,00212	10,64
P25	96,4587	23	637,01	3,1	0,008	0,158	0,16	10	0,00339	17,02
P26	96,4587	26	630,62	16,5	0,008	0,832	0,16	43	0,00248	12,49
P27	95,8588	37	604,47	7	0,008	0,339	0,16	44	0,00099	4,95
P28	95,8588	47	585,59	0	0,008	0,000	0,16	12	SEM FLUXO CH ₄	
P29	95,8588	47	585,59	2,5	0,008	0,117	0,16	25	0,00051	2,45
P30	95,1922	52	572,57	2,4	0,008	0,110	0,16	28	0,00042	2,06
P31	95,1922	50	576,12	3	0,008	0,138	0,16	24	0,00067	3,02

O tratamento estatístico dos resultados referentes aos ensaios com placa de fluxo analisou as médias dos valores obtidos dentro da área do aterro em que estavam inseridos, conforme metodologia apresentada no capítulo III. Os resultados foram avaliados pelo método do inverso ponderado da distância com o expoente “2”, também chamado inverso do quadrado da distância (IQD). Os valores calculados para as médias na segunda campanha de medidas, segundo o método IQD, são apresentados no quadro 4.19.

Quadro 4.19: Avaliação da média dos resultados do fluxo de gás metano obtido nos ensaios com placa de fluxo conforme as áreas do aterro de Londrina em que estavam inseridos na segunda campanha de medidas

Área do aterro	Ensaio com placa de fluxo	Média aritmética dos ensaios	Média obtida pelo método IQD
		Nm ³ /m ² .ano	Nm ³ /m ² .ano
Área 1	P-01 a P-12 e P-17 a P-22	88,70	82,67
Área 2	P-23 a P-25	190,72	164,19
Área 3	P-26 a P-27 e P-29 a P-31	43,75	38,91

As diferenças existentes nas emissões de gás metano das três áreas alinham-se com o potencial de produção de gás metano dos RSD depositados em cada área, atribuído às diferenças nas fases de biodegradação em que se encontravam na ocasião da campanha. No entanto, essa análise pode ser considerada preliminar por não terem sido realizados estudos probatórios para o evento constatado.

Os drenos verticais de percolação de gases na segunda campanha de medidas foram nomeados DA-01 a DAN-22. Os drenos DA-01 a DA-12 seguem a ordenação numérica adotada na primeira campanha. Em relação à primeira campanha, constatou-se que três drenos foram extintos (DA-06, DA-11 e DA-12) por motivos não especificados. Os drenos DAN-13 a DAN-22 foram criados no intervalo de tempo existente entre as duas primeiras campanhas (outubro de 2009 e setembro de 2010).

A maioria dos drenos verticais se localizava na área 1. O dreno DA-07 se localizava na área 2 e os drenos DA-08, DA-09 e DA-10 se localizavam na área 3 (figura 3.12). Após a coleta dos dados em campo, os valores obtidos foram lançados no quadro 4.20 para obtenção das vazões de gases nos drenos.

Quadro 4.20: Resultados calculados para os ensaios realizados nos drenos na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS DRENOS-SEGUNDA CAMPANHA															
DRENO	DIA/MÊS	COTA	PRESSÃO ATM.	PORCENTAGEM NO BIOGÁS				TEMP. DO BIOGÁS	VELOCIDADES DO BIOGÁS NOS DRENOS				DIÂM. INT. DO DRENO	VAZÃO BIOGÁS NO DRENO	VAZÃO CH ₄ NO DRENO
				CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S		1	2	3	média			
		m	kPa	%	%	%	ppm	°C	m/s	m/s	m/s	m/s	mm	Nm ³ /h	Nm ³ /h
DA-01	4/9	546	96,0588	8,60%	8,60%	11,10%	0	33,30	0,07	0,08	0,12	0,09	80,00	1,38	0,12
DA-02	5/9	545	96,4321	17,50%	18,00%	13,10%	0	32,90	0,92	1,03	0,98	0,98	80,00	15,01	2,66
DA-03	5/9	545	96,4321	18,00%	18,00%	13,70%	2	31,90	1,05	1,20	1,10	1,12	80,00	17,22	3,14
DA-04	4/9	543	96,0588	9,00%	5,20%	13,00%	0	33,40	1,86	2,10	1,94	1,97	80,00	30,09	2,75
DA-05	5/9	543	96,4321	26,50%	24,40%	10,40%	1	28,00	1,10	1,40	0,98	1,16	80,00	18,16	4,88
DA-06	DRENO EXTINTO														
DA-07	5/9	534	96,4321	55,00%	45,00%	0,40%	63	41,30	6,02	6,17	6,08	6,09	73,00	75,86	42,28
DA-08	4/9	531	96,0588	59,00%	40,00%	1,50%	2	36,40	1,58	1,57	1,61	1,59	73,00	19,73	11,84
DA-09	4/9	531	96,0588	9,60%	7,20%	12,50%	0	32,20	0,05	0,07	0,05	0,06	73,00	0,72	0,07
DA-10	4/9	531	96,0588	52,00%	38,00%	4,00%	3	40,60	1,97	1,70	1,70	1,79	73,00	22,26	11,77
DA-11	DRENO EXTINTO														
DA-12	DRENO EXTINTO														
DAN-13	5/9	541	96,4321	27,50%	24,50%	10,80%	1	38,90	2,40	2,58	2,30	2,43	73,00	30,46	8,49
DAN-14	5/9	541	96,4321	10,00%	9,80%	16,10%	1	33,20	1,59	1,60	1,40	1,53	73,00	19,56	1,98
DAN-15	5/9	541	96,4321	17,00%	13,00%	15,10%	1	36,90	1,35	1,46	1,32	1,38	73,00	17,39	3,00
DAN-16	5/9	541	96,4321	51,00%	47,00%	0,50%	12	40,80	3,20	3,40	3,10	3,23	73,00	40,34	20,85
DAN-17	5/9	541	96,4321	10,50%	20,50%	12,30%	4	37,30	1,50	1,80	1,90	1,73	73,00	21,87	2,33
DAN-18	5/9	539	96,4321	51,00%	43,00%	0,90%	100	45,70	5,53	5,61	5,80	5,65	73,00	69,37	35,85
DAN-19	5/9	539	96,4321	54,00%	46,00%	0,30%	49	46,10	2,54	2,69	2,51	2,58	73,00	31,65	17,32
DAN-20	5/9	539	96,4321	54,00%	43,00%	4,60%	11	40,20	2,38	2,43	2,36	2,39	73,00	29,88	16,35
DAN-21	5/9	539	96,4321	40,00%	52,00%	0,60%	0	35,60	0,95	1,00	0,99	0,98	73,00	12,43	5,04
DAN-22	5/9	539	96,4321	57,00%	45,00%	0,30%	68	39,60	1,28	1,30	1,40	1,33	73,00	16,62	9,60
SOMA														490,01	200,30

Os resultados calculados para as vazões de gás metano nos drenos apresentaram valores variando no intervalo entre 0,07 Nm³/h no dreno DA-01 a 42,28 Nm³/h no dreno DA-07. A variação dos valores pode ter diversos motivos, como profundidade e abrangência do dreno na massa de lixo, forma de execução do dreno, idade do lixo em decomposição, entre outras. A média obtida para a vazão de gás metano em todos os drenos foi de 10,54 Nm³/h. Os drenos DA-01 e DA-09 apresentaram vazões baixas, com possibilidade de estarem entupidos ou com resíduos em fase final de biodegradação. Os drenos DA-02, DA-03, DA-04, DA-05, DAN-13, DAN-14, DAN-15, DAN-17, DAN-21 e DAN-22 apresentaram vazões abaixo de 10 Nm³/h. Nos drenos DA-07, DA-08, DA-10, DAN-16, DAN-18, DAN-19, DAN-20 e P-13 foram constatadas vazões de gás metano superiores a 10 Nm³/h. O dreno DA-07 (DV-07 da primeira campanha) apresentava modificações na sua extremidade para adaptação do queimador de gases. Na primeira campanha esse dreno apresentou a maior vazão de todos os drenos (190,2 Nm³/h), o que se repetiu na segunda campanha (42,28 Nm³/h). No entanto, as modificações de estrangulamento de seção executadas para adaptação do queimador, podem ter ocasionado a fuga de gases pela camada de superfície nas proximidades do

dreno. A soma das vazões nos 20 pontos de drenos registrou 200,30 Nm³/h, valor inferior à soma dos doze drenos da primeira campanha de medidas (292,5 Nm³/h).

A maioria dos drenos apresentou leitura de gás sulfídrico, com exceção dos drenos DA-01, DA-02, DA-04, DA-09, DA-21. Isso denota que o aterro de Londrina tem produção do gás na maior parte da massa de lixo. Verificou-se que os ensaios com placa de fluxo registraram pouca presença de gás sulfídrico, podendo ser possível concluir que a camada de cobertura retém a maior parcela da percolação do mesmo. Os drenos DA-07, DAN-18, DAN-19 e DAN-22 apresentaram maiores valores em partes por milhão de gás sulfídrico. O dreno DAN-18 apresentou quantidade elevada (100 ppm), levando o aparelho a extrapolar o limite possível de sua leitura. Esse dreno também apresentou a segunda maior vazão de gás metano (35,85 Nm³/h) na segunda campanha, pouco inferior ao DA-07 (42,28 Nm³/h).

Observando a temperatura registrada no biogás dos drenos verticais, verificou-se que a temperatura tem tendência de alta conforme aumenta a participação em volume do gás metano.

A quantificação das emissões de gás metano no aterro de Londrina por meio dos dados da segunda campanha de medidas orientou-se pelos métodos utilizados na primeira campanha e apresentados na metodologia.

O quadro 4.21 apresenta de forma detalhada os resultados da emissão de gás metano obtidos em cada uma das três áreas do aterro controlado de Londrina, tanto na superfície como através dos drenos.

Quadro 4.21: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

EMISSÃO DE GÁS METANO OBTIDA A PARTIR DOS ENSAIOS DE PLACA E DOS ENSAIOS NOS DRENOS VERTICAIS - SEGUNDA CAMPANHA									
ÁREAS DO ATERRO	ÁREA 1 (51.535 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 2 ANOS		ÁREA 2 (50.506 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 6 ANOS		ÁREA 3 (49.852 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS HÁ MAIS DE 6 ANOS		Emissão total na superfície	Emissão total nos drenos	EMISSÃO TOTAL NO ATERRO
ENSAIOS COM PLACA DE FLUXO	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 1 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 2 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 3 (Nm ³ /ano)	Emissão anual na Superfície do Aterro (Nm ³ /ano)		Emissão Anual Total no Aterro (Nm ³ /ano)
P-01	7,74		*		*				
P-02	43,97		*		*				
P-03	57,22		*		*				
P-04	16,40		*		*				
P-05	66,79		*		*				
P-06	11,20		*		*				
P-07	133,50		*		*				
P-08	285,63		*		*				
P-09	16,87		*		*				
P-10	61,54		*		*				
P-11	28,54		*		*				
P-12	12,89		*		*				
P-13	*		*		*				
P-14	*		*		*				
P-15	*		*		*				
P-16	*		*		*				
P-17	38,78		*		*				
P-18	422,57		*		*				
P-19	104,00		*		*				
P-20	67,18		*		*				
P-21	193,73		*		*				
P-22	28,15		*		*				
P-23	*		329,83		*				
P-24	*		93,21		*				
P-25	*		149,13		*				
P-26	*		*		109,42				
P-27	*		*		43,39				
P-28	*		*		*				
P-29	*		*		21,49				
P-30	*		*		18,01				
P-31	*		*		26,43				
EMISSÕES SUPERFICIAIS-MÉDIA PELO IQD	82,67	4.260.398	164,19	8.292.580	38,91	1.939.741	14.492.720		
MEDIÇÕES EM DRENOS VERTICAIS	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)	Emissão anual na Área 1 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)	Emissão anual na Área 2 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /h)	Emissão anual na Área 3 (Nm ³ /ano)		Emissão anual nos Drenos do Aterro (Nm ³ /ano)	
DA-01	0,12		*		*				
DA-02	2,66		*		*				
DA-03	3,14		*		*				
DA-04	2,75		*		*				
DA-05	4,88		*		*				
DA-06	**		**		**				
DA-07	*		42,28		*				
DA-08	*		*		11,84				
DA-09	*		*		0,07				
DA-10	*		*		11,77				
DA-11	**		**		**				
DA-12	**		**		**				
DAN-13	8,49		*		*				
DAN-14	1,98		*		*				
DAN-15	3,00		*		*				
DAN-16	20,85		*		*				
DAN-17	2,33		*		*				
DAN-18	35,85		*		*				
DAN-19	17,32		*		*				
DAN-20	16,35		*		*				
DAN-21	5,04		*		*				
DAN-22	9,60		*		*				
EMISSÕES POR DRENOS	134,34	1.176.817	42,28	370.335	23,69	207.496		1.754.648	16.247.368
Observações:	** drenos extintos após a primeira campanha de ensaios								

O valor total das emissões de gás metano no aterro foi de 16.247.368 Nm³/ano. Os valores obtidos para a emissão superficial nas três áreas do aterro alinharam-se com as fases de biodegradação previamente escolhidas. A área 1, com deposição de lixo mais recente, apresentou valores de emissão de gás metano intermediários às outras duas áreas (4.260.398 Nm³/ano ou 82,67 Nm³/m².ano), indicando fases iniciais de biodegradação. A área 2, com resíduos depositados de idade até 6 anos, mostrou maior emissão superficial de gases (8.292.580 Nm³/ano ou 164,19 Nm³/m².ano), indicando que os resíduos estão em plena fase metanogênica. A área 3, com resíduos mais antigos, apresentou dados típicos da fase de maturação (1.939.741 Nm³/ano ou 38,91 Nm³/m².ano).

Os drenos mostraram valores de emissão pequenos em relação à emissão total do aterro (10,8%). Os motivos orientam-se para o fato do aterro ser remediado, não tendo sido planejado como aterro sanitário. As linhas internas dos drenos coletam parcela pequena dos gases produzidos, o que foi comprovado pelos valores de emissão superficial do aterro.

O volume de gás carbônico emitido pelo aterro de Londrina foi calculado observando-se a sequencia metodológica utilizada para quantificar o gás metano. Os resultados obtidos são exibidos no quadro 4.22, onde é mostrada de forma resumida a emissão desse gás.

Quadro 4.22: Resultados quantitativos de gás carbônico obtidos na superfície e nos drenos verticais na segunda campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

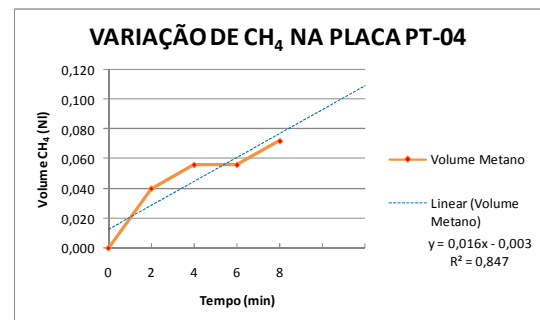
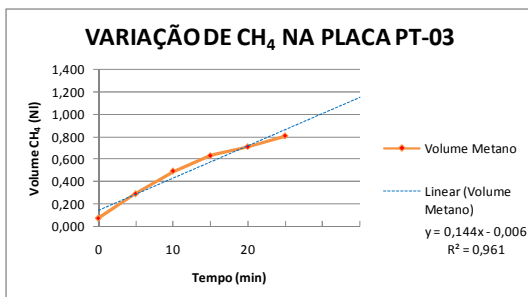
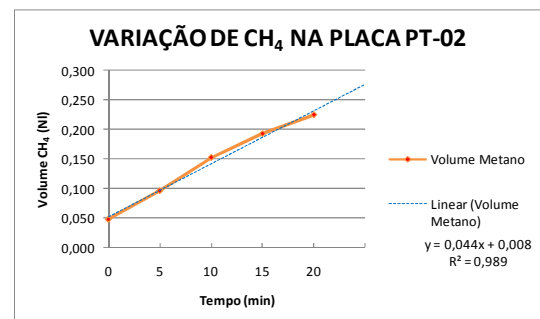
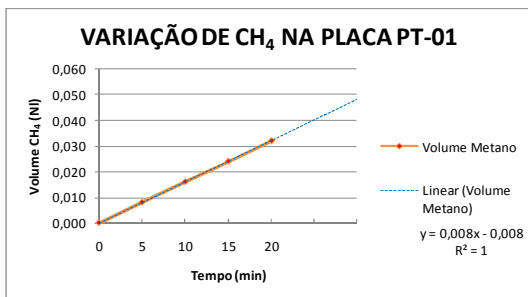
EMIÇÃO DE GÁS CARBÔNICO PELA CAMADA DE SUPERFÍCIE E PELOS DRENOS VERTICAIS									
SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIDAS NO ATERRO DE LONDRINA (SETEMBRO/2010)									
ÁREAS DO ATERRO	ÁREA 1 (51.535 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 2 ANOS		ÁREA 2 (50.506 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 6 ANOS		ÁREA 3 (49.852 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS HÁ MAIS DE 6 ANOS		Emissão total na superfície	Emissão total nos drenos	EMIÇÃO TOTAL NO ATERRO
MEDIÇÕES SUPERFICIAIS COM PLACAS DE FLUXO	Média de Emissões de CH ₄ (IQD)	Emissão anual na Área 1	Média de Emissões de CH ₄ (IQD)	Emissão anual na Área 2	Média de Emissões de CH ₄ (IQD)	Emissão anual na Área 3	Emissão anual pela Superfície do Aterro		Emissão Anual Total no Aterro
	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)		(Nm ³ /ano)
EMIÇÕES PELA CAMADA DE SUPERFÍCIE	60,11	3.097.769	198,70	10.035.542	42,51	2.119.209	15.252.520		
MEDIÇÕES EM DRENOS VERTICAIS	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 1	Emissão anual na Área 1	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 2	Emissão anual na Área 2	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 3	Emissão anual na Área 3		Emissão anual nos Drenos do Aterro	
	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)		(Nm ³ /ano)	
EMIÇÕES PELOS DRENOS	118,17	1.035.169	34,14	299.066	16,40	143.664		1.477.900	16.730.419

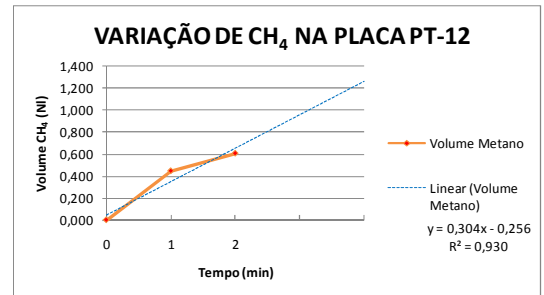
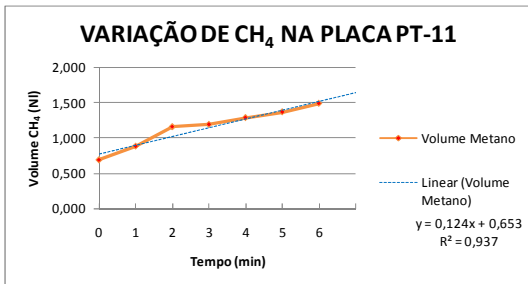
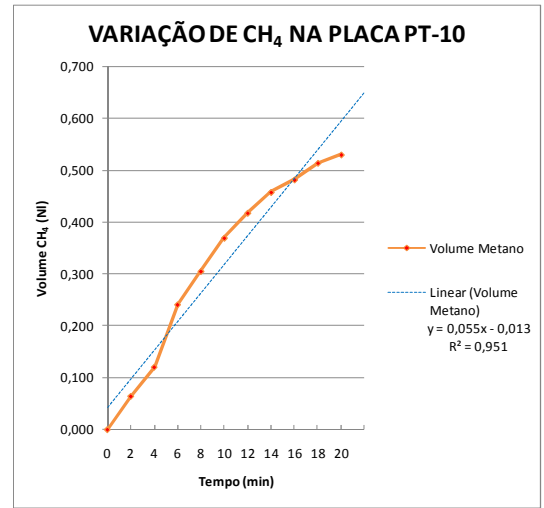
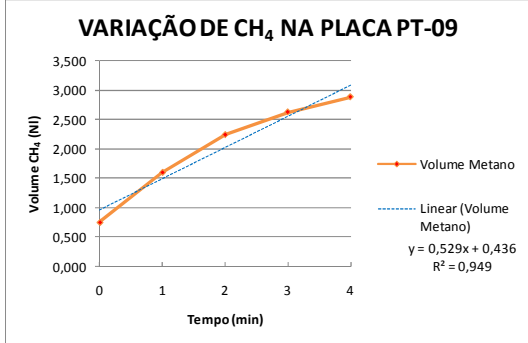
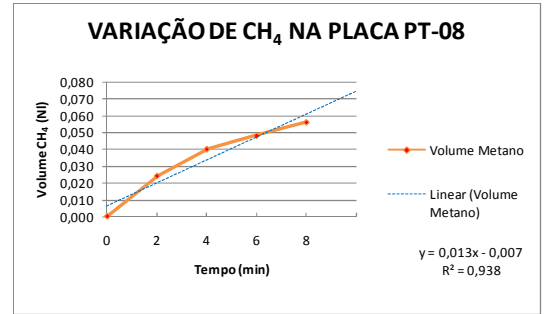
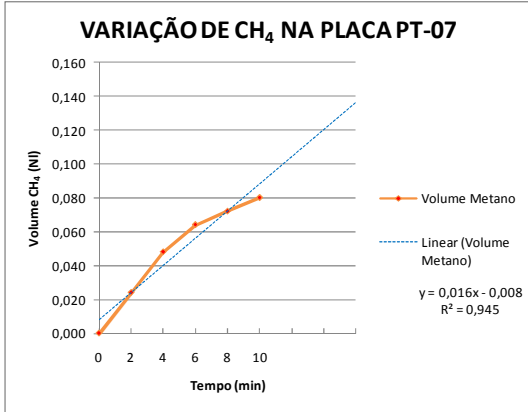
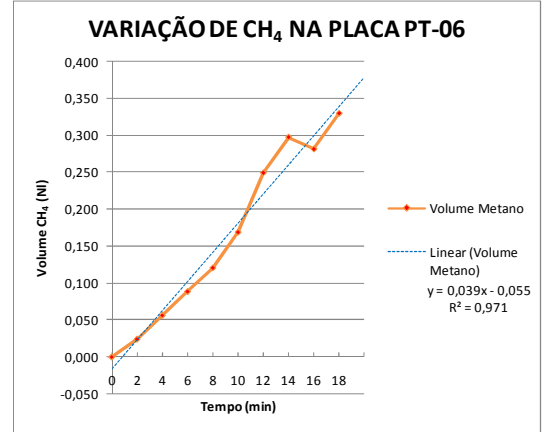
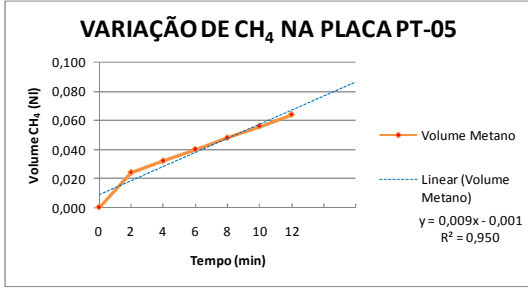
O volume calculado para a emissão de gás carbônico na segunda campanha de medidas foi de 16.730.419 Nm³/ano. A estimativa da emissão de biogás foi de 32.977.786 Nm³/ano, considerando que os outros gases são secundários em termos quantitativos na composição do biogás.

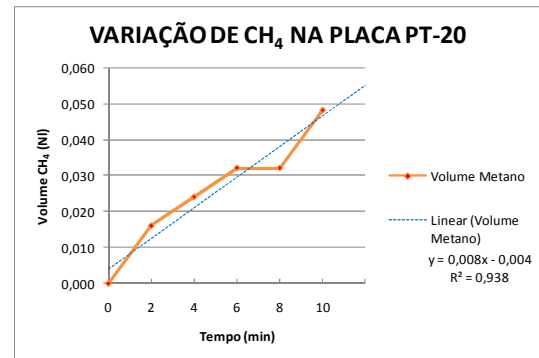
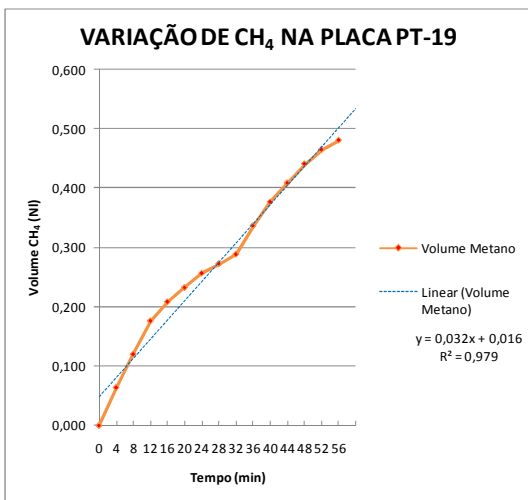
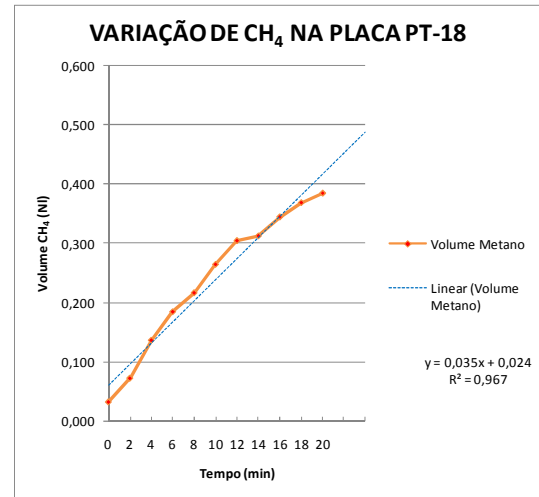
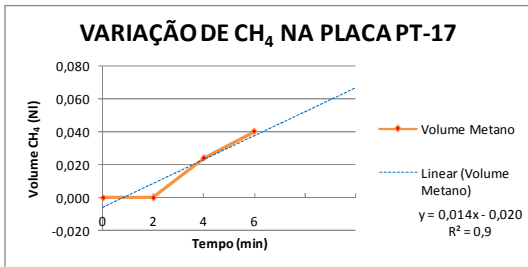
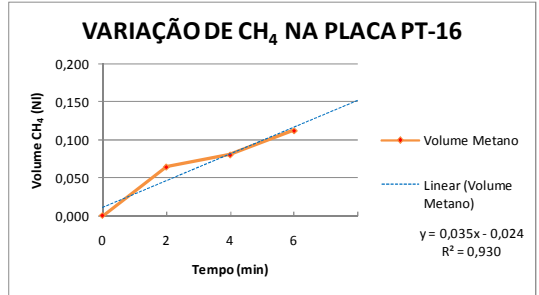
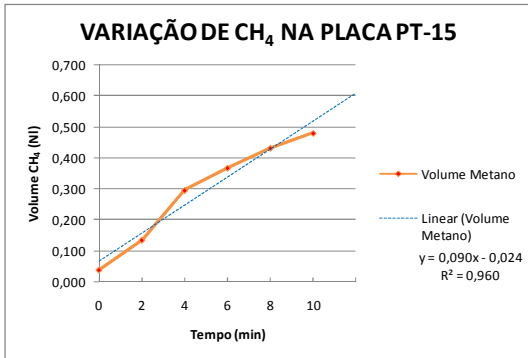
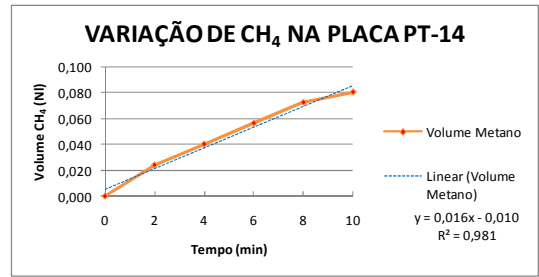
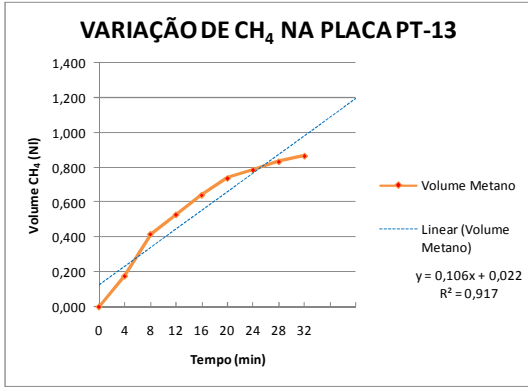
4.7.3. Resultados obtidos na terceira campanha de medidas

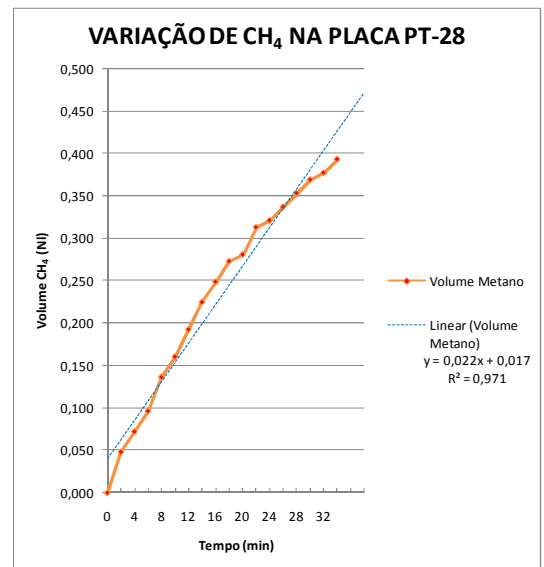
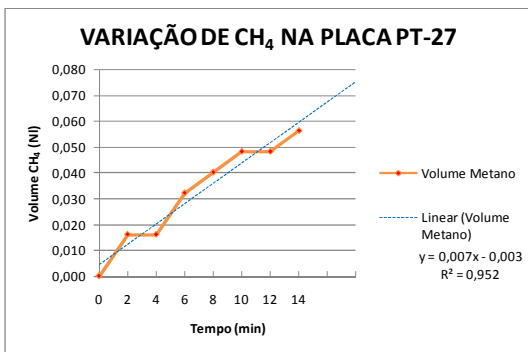
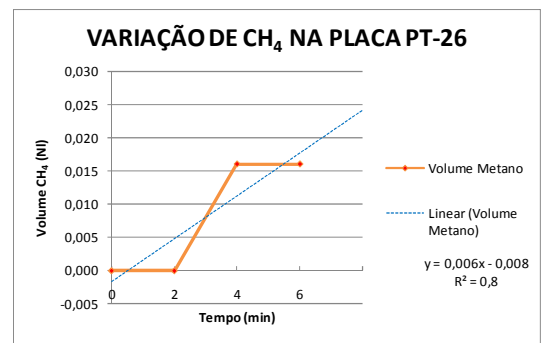
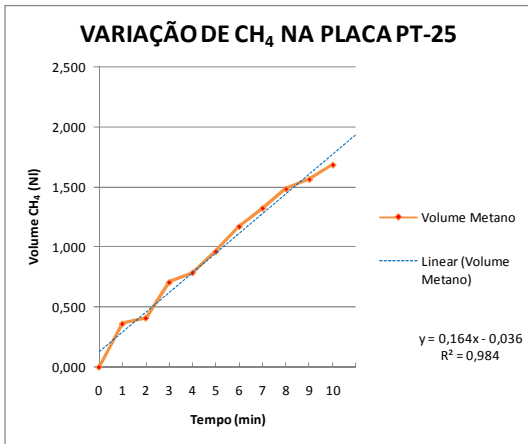
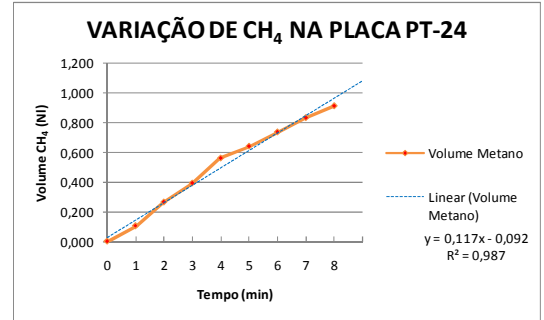
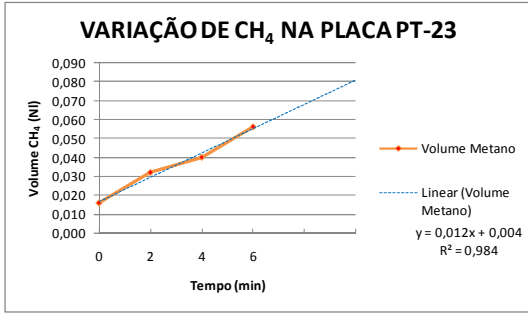
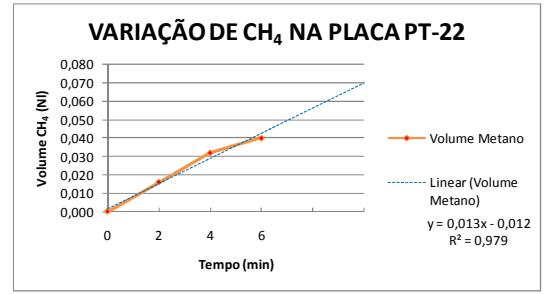
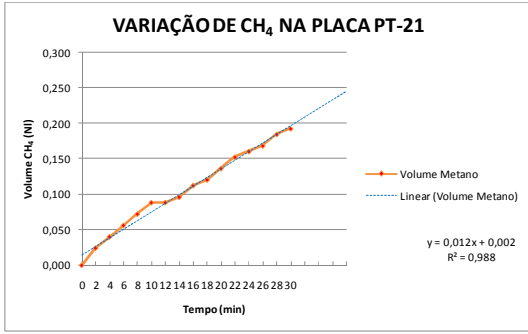
A terceira campanha de medidas se realizou em fins de outubro e início de novembro de 2010. Foram feitos 36 ensaios com placa estática de fluxo, nomeados PT-01 a PT-36. Os dados colhidos alimentaram planilhas confeccionadas no software “Excell” e resultaram em 36 gráficos que descrevem o crescimento do volume de gás metano em relação ao tempo em cada ensaio. As densidades do gás obtidas em campo foram corrigidas para CNTP pela equação dos gases ideais, conforme metodologia apresentada.

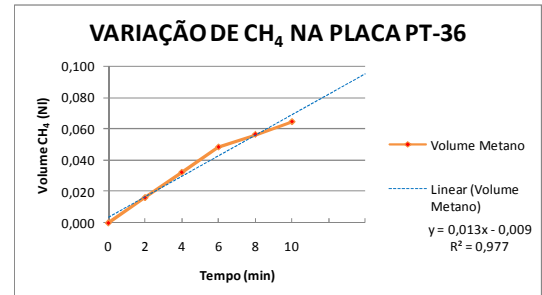
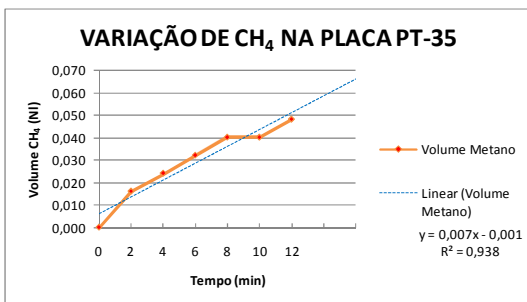
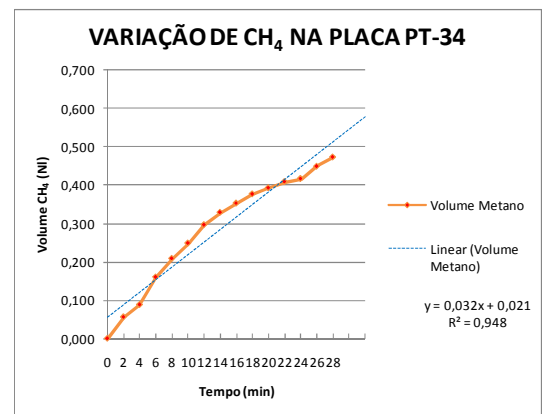
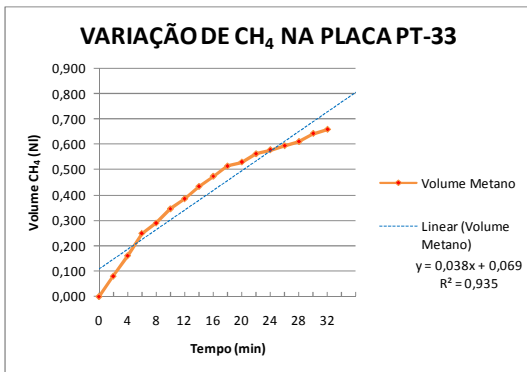
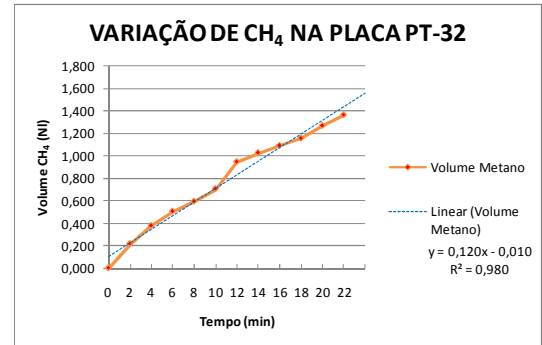
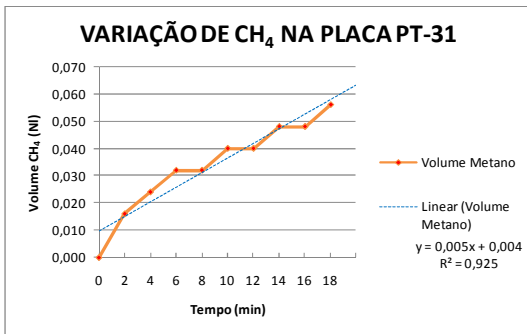
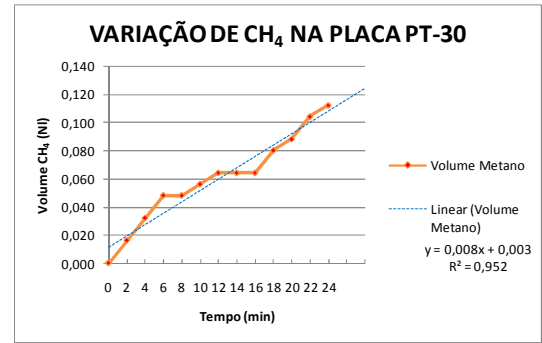
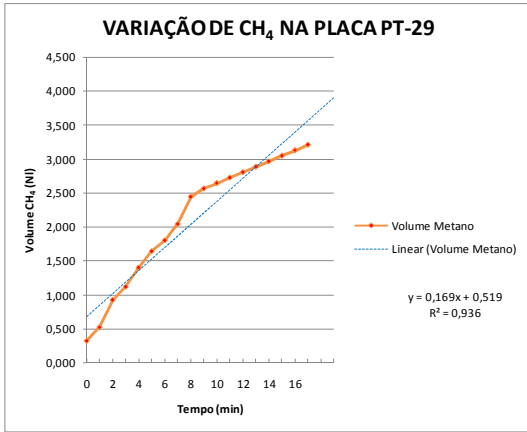
A variação do volume de gás metano em função do tempo é apresentada nas figuras 4.8. A unidade de medida utilizada pra quantificação do volume de gás é o NLitro, resultando posteriormente um fluxo superficial em NL/h.m².











Figuras 4.8: Variação do volume de gás metano ao longo do tempo nos ensaios com placa estática de fluxo da terceira campanha de medidas

Para avaliação dos ensaios foram considerados os pontos que exibiam forte tendência a linearidade entre as variáveis volume de gás metano e tempo transcorrido no ensaio, desprezando pontos obtidos após estabilização da quantidade de gás no ambiente interno da placa. Os resultados obtidos nos gráficos das figuras 4.8 mostram que os ensaios PT-01, PT-02, PT-05, PT-06, PT-10, PT-14, PT-15, PT-18, PT-19, PT-21, PT-22, PT-23, PT-24, PT-25, PT-27, PT-28, PT-30, PT-32 e PT-36 apresentaram coeficientes de correlação entre as variáveis volume de metano e tempo acima de 95%. Os ensaios PT-07, PT-08, PT-09, PT-11, PT-12, PT-13, PT-16, PT-17, PT-20, PT-29, PT-31, PT-33, PT-34 e PT-35 mostraram coeficientes de correlação entre 90% e 95%, representando metade dos ensaios realizados. Os ensaios PT-04 e PT-26 apresentaram coeficientes de correlação inferiores a 90%, representando a menor parcela dos ensaios realizados.

Com relação à quantidade de gás metano acumulado no ambiente interno da placa estática de fluxo, observou-se novamente grande amplitude de variação, dependendo essencialmente do ponto em que se coletavam os dados. Os ensaios PT-09, PT-11, PT-25, PT-29, PT-32 acumularam, ao final do ensaio, volume de gás metano superior a 1,0 NL. Os ensaios PT-03, PT-10, PT-12, PT-13, PT-19, PT-24, PT-33 acumularam volume de gás metano entre 0,5 NL e 1,0 NL. Os ensaios PT-02, PT-06, PT-15, PT-16, PT-18, PT-21, PT-28, PT-30 e PT-34 mostraram valores de gás metano acumulado no interior da placa de fluxo entre 0,1 NL e 0,5 NL. Os ensaios PT-01, PT-04, PT-05, PT-07, PT-08, PT-14, PT-17, PT-20, PT-22, PT-23, PT-26, PT-27, PT-31, PT-35 e PT-36 acumularam valores inferiores a 0,1 NL de gás metano ao final do ensaio.

Analisando o tempo transcorrido para os ensaios de superfície, verificou-se que o mesmo oscilou entre 4 e 56 minutos. Um dos motivos relacionados à variação do tempo no ensaio foi o potencial de fluxo de gás metano no local do ensaio. O ensaio PT-19 foi realizado com tempo superior a 56 minutos. Os ensaios PT-13, PT-19, PT-21, PT-25 e PT-33 foram realizados com duração entre 30 e 60 minutos. Os demais ensaios se realizaram em período de tempo inferior a 30 minutos.

Os valores de pressão atmosférica, tanto na ocasião dos ensaios com placa de fluxo como nos ensaios efetuados nos drenos verticais, foram fornecidos pela estação meteorológica do

Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR) de Londrina e corrigidos para o aterro de Londrina conforme metodologia exibida no capítulo III.

O quadro 4.23 mostra os resultados finais dos 36 ensaios da terceira campanha de medidas, utilizando placa estática de fluxo.

Quadro 4.23: Resultados calculados para os ensaios com placa de fluxo na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

RESULTADOS DOS ENSAIOS COM PLACA DE FLUXO - TERCEIRA CAMPANHA										
Ensaio	Pressão Atm.	Temp. t _{máx} do Ensaio	Dens. CH ₄ na temp. (t)	Porc. máxima CH ₄ na Placa	Vol. da Placa de Fluxo	Quant. final de CH ₄ na Placa	Área da Placa de Fluxo	Tempo do Ensaio	Fluxo de CH ₄ em Massa e Volume	
	kPa	°C	g/m ³	%	m ³	g	m ²	min	g/s.m ²	NLitro/h.m ²
PT01	95,7255	38,0	593,82	0,40	0,008	0,019	0,16	20,0	0,000099	0,50
PT02	95,7255	39,0	591,92	2,80	0,008	0,133	0,16	20,0	0,000691	3,47
PT03	95,7255	39,0	591,92	10,00	0,008	0,474	0,16	25,0	0,001973	9,92
PT04	95,7255	54,0	564,78	0,90	0,008	0,041	0,16	8,0	0,000529	2,66
PT05	95,7255	59,0	556,28	0,80	0,008	0,036	0,16	12,0	0,000309	1,55
PT06	95,6588	51,0	569,61	4,10	0,008	0,187	0,16	18,0	0,001081	5,44
PT07	95,6588	60,0	554,22	1,00	0,008	0,044	0,16	10,0	0,000462	2,32
PT08	95,6588	57,0	559,26	0,70	0,008	0,031	0,16	8,0	0,000408	2,05
PT09	95,6588	51,0	569,61	36,00	0,008	1,640	0,16	4,0	0,042721	214,80
PT10	95,6588	48,0	574,93	6,60	0,008	0,304	0,16	20,0	0,001581	7,95
PT11	95,6588	47,0	576,73	18,50	0,008	0,854	0,16	6,0	0,014819	74,51
PT12	95,6588	43,0	584,02	7,60	0,008	0,355	0,16	2,0	0,018494	92,99
PT13	95,6588	38,0	593,41	10,80	0,008	0,513	0,16	32,0	0,001669	8,39
PT14	96,3254	22,0	629,93	1,00	0,008	0,050	0,16	10,0	0,000525	2,64
PT15	96,3254	24,0	625,70	6,00	0,008	0,300	0,16	10,0	0,003128	15,73
PT16	96,3254	24,0	625,70	1,40	0,008	0,070	0,16	6,0	0,001217	6,12
PT17	96,3254	28,0	617,38	0,50	0,008	0,025	0,16	6,0	0,000429	2,16
PT18	96,3254	30,0	613,31	4,80	0,008	0,236	0,16	20,0	0,001227	6,17
PT19	96,3254	36,0	601,41	6,00	0,008	0,289	0,16	56,0	0,000537	2,70
PT20	96,3254	35,0	603,36	0,60	0,008	0,029	0,16	10,0	0,000302	1,52
PT21	96,0588	46,0	580,95	2,40	0,008	0,112	0,16	30,0	0,000387	1,95
PT22	96,0588	40,0	592,08	0,50	0,008	0,024	0,16	6,0	0,000411	2,07
PT23	96,0588	37,0	597,81	0,70	0,008	0,033	0,16	6,0	0,000581	2,92
PT24	96,0588	40,0	592,08	11,40	0,008	0,540	0,16	8,0	0,007031	35,35
PT25	96,0588	34,0	603,65	21,00	0,008	1,014	0,16	10,0	0,010564	53,11
PT26	96,0588	35,0	601,69	0,20	0,008	0,010	0,16	6,0	0,000167	0,84
PT27	96,0588	37,0	597,81	0,70	0,008	0,033	0,16	14,0	0,000249	1,25
PT28	96,0588	35,0	601,69	4,90	0,008	0,236	0,16	34,0	0,000723	3,63
PT29	96,0588	37,0	597,81	40,00	0,008	1,913	0,16	17,0	0,011722	58,94
PT30	96,0188	26,0	619,53	1,40	0,008	0,069	0,16	24,0	0,000301	1,51
PT31	96,0188	32,0	607,35	0,70	0,008	0,034	0,16	18,0	0,000197	0,99
PT32	96,0188	36,0	599,49	17,00	0,008	0,815	0,16	22,0	0,003860	19,41
PT33	96,0188	42,0	588,08	8,20	0,008	0,386	0,16	32,0	0,001256	6,31
PT34	96,0188	49,0	575,30	5,90	0,008	0,272	0,16	28,0	0,001010	5,08
PT35	95,7921	47,0	577,53	0,60	0,008	0,028	0,16	12,0	0,000241	1,21
PT36	95,7921	47,0	585,18	0,80	0,008	0,037	0,16	10,0	0,000385	1,94

O fluxo volumétrico de gás metano variou de 0,50 NL/h.m² no ensaio PT-01 até 92,99 NL/h.m² no ensaio PT-12, desconsiderando o ensaio PT-09 por apresentar um fluxo desproporcional para emissões superficiais. Os motivos deste fluxo exagerado novamente

podem se relacionar com drenos antigos aterrados pela operadora, como o P-13 na segunda campanha. A média geral dos fluxos volumétricos, desconsiderando o ensaio PT-09 foi de 12,72 NL/h.m². O fluxo representa, em termos de vazão mássica, 218,1 g/dia.m², valor superior ao obtido na segunda campanha de medidas e inferior ao da primeira campanha.

Com relação ao tratamento estatístico dos resultados dos ensaios com placa de fluxo, as médias foram analisadas dentro da área do aterro em que estavam inseridos como na segunda campanha. Os valores calculados para as médias na terceira campanha de medidas, segundo o método de interpolação utilizando o inverso do quadrado da distância (IQD), são apresentados no quadro 4.24.

Quadro 4.24: Avaliação da média dos resultados do fluxo de gás metano obtido nos ensaios com placa de fluxo conforme as áreas do aterro de Londrina em que estavam inseridos na terceira campanha de medidas

Área do aterro	Ensaio com placa de fluxo	Média aritmética dos ensaios	Média obtida pelo método IQD
		Nm ³ /m ² .ano	Nm ³ /m ² .ano
Área 1	P-01 a P-08 e P-10 a P-21	110,08	122,10
Área 2	P-22 a P-29	173,55	171,15
Área 3	P-30 a P-36	45,72	52,96

As diferenças verificadas entre as médias obtidas nas três áreas se orientam para as diferenças nas fases de biodegradação dos RSD depositados em cada área. As proporções existentes entre as emissões médias de gás metano em cada área e a lógica da idade dos RSD depositados foram observadas nas três campanhas de medidas.

Os drenos verticais para emissão de gases do aterro de Londrina na terceira campanha de medidas foram nomeados DA-01 a DAN-23. O dreno DAN-23 foi instalado precariamente pela operadora do aterro, no ponto exato onde se realizou o ensaio com placa de fluxo P-13 da segunda campanha de medidas. O dreno DA-01 havia sido extinto após a segunda campanha e os drenos DA-06, DA-11 e DA-12 não mais existiam desde a primeira campanha de medidas.

O quadro 4.25 resume os resultados obtidos no tratamento dos dados colhidos em campo com drenos verticais na terceira campanha de medidas.

Quadro 4.25: Resultados obtidos nos ensaios realizados nos drenos verticais na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

RESULTADOS DOS ENSAIOS REALIZADOS NOS DRENOS-TERCEIRA CAMPANHA																
DRENO	DIA/MÊS	COTA	PRESSÃO ATM.	PORCENTAGEM NO BIOGÁS				TEMP. DO BIOGÁS	VELOCIDADES DO BIOGÁS NOS DRENOS				DIÂM. INT. DO DRENO	VAZÃO BIOGÁS NO DRENO	VAZÃO CH ₄ NO DRENO	
				CH ₄	CO ₂	O ₂	H ₂ S		1	2	3	média				
		m	kPa	%	%	%	ppm	°C	m/s	m/s	m/s	m/s	mm	Nm ³ /h	Nm ³ /h	
DA-01				DRENO EXTINTO												
DA-02	31/10	545	96,4321	15,40%	16,50%	13,00%	2	29,50	0,40	0,56	0,48	0,48	80,00	7,43	1,14	
DA-03	31/10	545	96,4321	31,50%	32,00%	6,40%	2	30,40	0,50	0,63	0,50	0,54	80,00	8,38	2,64	
DA-04	31/10	543	96,0588	26,00%	26,00%	10,00%	2	30,80	0,40	0,80	0,40	0,53	80,00	8,22	2,14	
DA-05	31/10	543	96,4321	48,00%	43,00%	0,50%	3	28,20	0,56	0,63	0,65	0,61	80,00	9,53	4,57	
DA-06				DRENO EXTINTO												
DA-07	31/10	534	96,4321	46,00%	41,00%	0,00%	67	39,00	5,48	4,50	5,05	5,01	73,00	62,58	28,79	
DA-08	31/10	531	96,0588	44,30%	38,00%	0,50%	0	39,30	0,70	0,96	1,17	0,94	73,00	11,77	5,21	
DA-09	31/10	531	96,0588	0,00%	0,00%	20,90%	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	73,00	0,00	0,00	
DA-10	31/10	531	96,0588	40,00%	34,00%	0,80%	0	34,20	0,25	0,33	0,38	0,32	73,00	4,06	1,62	
DA-11				DRENO EXTINTO												
DA-12				DRENO EXTINTO												
DAN-13	31/10	541	96,4321	28,00%	21,50%	4,50%	2	35,00	0,95	0,79	0,95	0,90	73,00	11,35	3,18	
DAN-14	31/10	541	96,4321	29,50%	30,00%	9,60%	1	34,00	0,56	0,44	0,30	0,43	73,00	5,50	1,62	
DAN-15	31/10	541	96,4321	14,80%	18,50%	11,50%	3	33,00	0,47	0,39	0,50	0,45	73,00	5,77	0,85	
DAN-16	31/10	541	96,4321	41,00%	41,00%	0,10%	22	2,21	1,86	2,15	3,10	2,37	73,00	33,56	13,76	
DAN-17	31/10	541	96,4321	26,00%	29,00%	6,10%	1	33,20	0,91	1,15	0,91	0,99	73,00	12,60	3,28	
DAN-18	31/10	539	96,4321	47,00%	44,00%	0,10%	81	44,40	6,35	6,63	6,56	6,51	73,00	79,97	37,59	
DAN-19	31/10	539	96,4321	44,00%	42,00%	0,60%	37	33,40	0,74	0,95	0,70	0,80	73,00	10,13	4,46	
DAN-20	31/10	539	96,4321	45,00%	36,00%	1,40%	14	38,80	1,45	2,20	1,98	1,88	73,00	23,46	10,56	
DAN-21	31/10	539	96,4321	22,50%	25,00%	5,70%	17	30,60	0,55	0,28	0,45	0,43	73,00	5,48	1,23	
DAN-22	31/10	539	96,4321	44,00%	37,00%	0,20%	60	38,60	2,66	2,35	2,96	2,66	73,00	33,23	14,62	
DAN-23*	31/10	520	96,7254	43,00%	42,00%	0,00%	0	38,80	0,19	0,22	0,25	0,22	400,00	82,56	35,50	
SOMA														415,57	172,76	

*Dreno precário instalado no mesmo ponto P-13 da segunda campanha

As vazões de gás metano dos drenos verticais variaram de 0 Nm³/h no dreno DA-09 a 37,59 Nm³/h no dreno DAN-18. O dreno DA-09 não apresentou vazão de gás metano, podendo estar entupido ou em meio a lixo estabilizado. Sua localização (área 3) continha os resíduos sólidos depositados a mais tempo. Os drenos DA-02, DA-03, DA-04, DA-05, DA-08, DA-10, DAN-13, DAN-14, DAN-15, DAN-17, DAN-19 e DAN-21 mostraram vazões inferiores a 10 Nm³/h. Os drenos DA-07, DAN-16, DAN-18, DAN-20, DAN-22 e DAN-23 apresentaram vazões de gás metano superiores a 10 Nm³/h.

Com relação à presença de gás sulfídrico na composição do biogás, somente os drenos DA-08, DA-09 e DA-10 e DA-23 não apresentaram leitura desse gás. Os drenos DA-07, DAN-18 e DAN-22 apresentaram leituras superiores a 60 ppm de gás sulfídrico e os outros drenos mostraram valores intermediários.

O quadro 4.26 mostra os valores quantitativos das emissões parciais e finais de gás metano no aterro controlado de Londrina.

Quadro 4.26: Resultados quantitativos de gás metano obtidos na superfície e nos drenos verticais na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

EMISSÃO DE GÁS METANO OBTIDA A PARTIR DOS ENSAIOS DE PLACA E DOS ENSAIOS NOS DRENOS VERTICAIS - TERCEIRA CAMPANHA									
ÁREAS DO ATERRO	ÁREA 1 (51.535 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 2 ANOS		ÁREA 2 (50.506 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 6 ANOS		ÁREA 3 (49.852 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS HÁ MAIS DE 6 ANOS		Emissão total na superfície	Emissão total nos drenos	EMISSÃO TOTAL NO ATERRO
ENSAIOS COM PLACA DE FLUXO	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 1 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 2 (Nm ³ /ano)	Emissão de CH ₄ (Nm ³ /m ² .ano)	Emissão anual na Área 3 (Nm ³ /ano)	Emissão anual na Superfície do Aterro (Nm ³ /ano)		Emissão Anual Total no Aterro (Nm ³ /ano)
PT01	4,37		*		*				
PT02	30,49		*		*				
PT03	87,11		*		*				
PT04	23,38		*		*				
PT05	13,64		*		*				
PT06	47,74		*		*				
PT07	20,39		*		*				
PT08	18,00		*		*				
PT09	*		*		*				
PT10	69,80		*		*				
PT11	654,25		*		*				
PT12	816,52		*		*				
PT13	73,69		*		*				
PT14	23,18		*		*				
PT15	138,12		*		*				
PT16	53,71		*		*				
PT17	18,93		*		*				
PT18	54,16		*		*				
PT19	23,71		*		*				
PT20	13,32		*		*				
PT21	17,10		*		*				
PT22	*		18,15		*				
PT23	*		25,66		*				
PT24	*		310,42		*				
PT25	*		466,40		*				
PT26	*		7,38		*				
PT27	*		11,00		*				
PT28	*		31,90		*				
PT29	*		517,52		*				
PT30	*		*		13,30				
PT31	*		*		8,69				
PT32	*		*		170,44				
PT33	*		*		55,44				
PT34	*		*		44,60				
PT35	*		*		10,62				
PT36	*		*		17,00				
EMISSÕES SUPERFICIAIS-MÉDIA PELO IQD	122,10	6.292.424	171,15	8.644.102	52,96	2.640.162	17.576.687		
MEDIÇÕES EM DRENOS VERTICAIS	Emissão de CH₄ (Nm³/h)	Emissão anual na Área 1 (Nm³/ano)	Emissão de CH₄ (Nm³/h)	Emissão anual na Área 2 (Nm³/ano)	Emissão de CH₄ (Nm³/h)	Emissão anual na Área 3 (Nm³/ano)		Emissão anual nos Drenos do Aterro (Nm³/ano)	
DA-01	**		**		**				
DA-02	1,14		*		*				
DA-03	2,64		*		*				
DA-04	2,14		*		*				
DA-05	4,57		*		*				
DA-06	**		**		**				
DA-07	*		28,79		*				
DA-08	*		*		5,21				
DA-09	*		*		0,00				
DA-10	*		*		1,62				
DA-11	**		**		**				
DA-12	**		**		**				
DAN-13	3,18		*		*				
DAN-14	1,62		*		*				
DAN-15	0,85		*		*				
DAN-16	13,76		*		*				
DAN-17	3,28		*		*				
DAN-18	37,59		*		*				
DAN-19	4,46		*		*				
DAN-20	10,56		*		*				
DAN-21	1,23		*		*				
DAN-22	14,62		*		*				
DAN-23	35,50		*		*				
EMISSÕES POR DRENOS	137,14	1.201.337	28,79	252.171	6,84	59.907	0,0	1.513.415	19.090.103
Observações:	** drenos extintos após a segunda campanha de medidas								

O valor total das emissões de gás metano obtido na terceira campanha de medidas foi de 19.090.103 Nm³/ano. O número calculado se mostrou maior que os valores das emissões obtidos na primeira e segunda campanha de medidas no aterro de Londrina.

Os valores das emissões superficiais em cada área alinharam-se aos valores obtidos nas campanhas anteriores, voltando a confirmar as fases de biodegradação dos RSD na referida área. A área 2, preliminarmente selecionada como tendo seus resíduos na fase metanogênica, apresentou novamente os maiores valores de emissão superficial (8.644.102 Nm³/ano ou 171,15 Nm³/m².ano). A área 1, selecionada como contendo resíduos em fases iniciais de biodegradação, mostrou valores de emissão de gás metano intermediárias às outras duas áreas (6.292.424 Nm³/ano ou 122,10 Nm³/m².ano). A área 3, tendo sido selecionada como a área de RSD mais antigos, apresentou valores de emissão de gás metano típicos da fase de maturação (2.640.162 Nm³/ano ou 52,96 Nm³/m².ano). Cabe ressaltar que a comparação dos valores em termos de volume total é possível porque as áreas selecionadas para a terceira campanha têm dimensões próximas.

A emissão de gás metano por drenos verticais apresentou pequena queda nos valores em relação às outras duas campanhas. No entanto, os dois drenos de maior vazão (DA-07 e DAN-18) voltaram a confirmar a eficiência da segunda campanha de medidas. Em relação às emissões totais de gás metano no aterro, os drenos representaram somente 8,95% na terceira campanha de medidas (1.513.415 Nm³/ano).

A quantidade em volume de gás carbônico emitido pelo aterro controlado de Londrina na terceira campanha de medidas foi calculada seguindo a metodologia utilizada para quantificar o gás metano. Os resultados obtidos são exibidos no quadro 4.27.

Quadro 4.27: Resultados quantitativos de gás carbônico obtidos na superfície e nos drenos verticais na terceira campanha de medidas do aterro controlado de Londrina

EMISSÃO DE GÁS CARBÔNICO PELA CAMADA DE SUPERFÍCIE E PELOS DRENOS VERTICAIS									
TERCEIRA CAMPANHA DE ENSAIOS NO ATERRO DE LONDRINA (NOVEMBRO/2010)									
ÁREAS DO ATERRO	ÁREA 1 (51.535 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 2 ANOS		ÁREA 2 (50.506 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS ATÉ 6 ANOS		ÁREA 3 (49.852 m ²) - RESÍDUOS DEPOSITADOS HÁ MAIS DE 6 ANOS		Emissão total na superfície	Emissão total nos drenos	EMISSÃO TOTAL NO ATERRO
MEDIÇÕES SUPERFICIAIS COM PLACAS DE FLUXO	Média de Emissões de CH ₄	Emissão anual na Área 1	Média de Emissões de CH ₄	Emissão anual na Área 2	Média de Emissões de CH ₄	Emissão anual na Área 3	Emissão anual pela Superfície do Aterro		Emissão Anual Total no Aterro
	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /m ² .ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)		(Nm ³ /ano)
EMISSÕES PELA CAMADA DE SUPERFÍCIE	100,08	5.157.623	155,81	7.869.340	60,46	3.014.052	16.041.015		
MEDIÇÕES EM DRENOS VERTICAIS	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 1	Emissão anual na Área 1	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 2	Emissão anual na Área 2	Emissão de CH ₄ nos Drenos da Área 3	Emissão anual na Área 3		Emissão anual nos Drenos do Aterro	
	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /h)	(Nm ³ /ano)		(Nm ³ /ano)	
EMISSÕES PELOS DRENOS	128,95	1.129.602	25,66	224.782	5,85	51.246		1.405.630	17.446.644

O volume calculado para a emissão de gás carbônico na terceira campanha de medidas foi de 17.446.644 Nm³/ano. O volume de biogás emitido foi de 36.536.747 Nm³/ano, considerando novamente que outros gases são secundários em termos quantitativos na composição do biogás.

4.8. Discussão geral de resultados

Os itens anteriores desse capítulo apresentaram resultados sobre a geração de gases no aterro controlado de Londrina, alcançados fundamentalmente de duas fontes distintas: medições “in loco” e aplicação de modelos matemáticos. Os resultados de geração de biogás foram obtidos utilizando os modelos matemáticos sugeridos por organismos internacionais e por alguns autores, sobre a geração de gases a partir de deposição de RSD em aterros. Os resultados experimentais foram calculados por meio de três campanhas de medidas para obtenção das emissões que ocorriam no aterro.

O quadro 4.28 resume os resultados alcançados por meio dos modelos matemáticos bem como os resultados obtidos nas três campanhas de medidas.

Quadro 4.28: Resumo dos resultados obtidos para o aterro controlado de Londrina por meio dos modelos matemáticos e das três campanhas de medidas

PRODUÇÃO E EMISSÃO DE GASES NO ATERRO CONTROLADO DE LONDRINA											
RESULTADOS FINAIS OBTIDOS A PARTIR DE MODELOS MATEMÁTICOS E CAMPANHAS EXPERIMENTAIS											
MODELO TEÓRICOS	ANOS DE CONTRIBUIÇÃO	RESÍDUOS DEPOSITADOS EM 2010	TAXA ESPECÍFICA TEÓRICA DE PRODUÇÃO DE GÁS METANO	TAXA ESPECÍFICA TEÓRICA DE PRODUÇÃO DE GÁS CARBÔNICO	TAXA ESPECÍFICA TEÓRICA DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS	TAXA DE GERAÇÃO DE METANO (k)	POTENCIAL DE GERAÇÃO DE METANO (Lo)	GÁS METANO GERADO NO ATERRO EM 2010	GÁS CARBÔNICO GERADO NO ATERRO EM 2010	BIOGÁS GERADO NO ATERRO EM 2010	
	(anos)	(ton.)	(m ³ CH ₄ /kg RSD)	(m ³ CO ₂ /kg RSD)	(m ³ BIOGÁS/kg RSD)	(ano ⁻¹)	(m ³ CH ₄ /ano)	(Nm ³ CH ₄ /ano)	(Nm ³ CO ₂ /ano)	(Nm ³ BIOGÁS/ano)	
MODELO TRIANGULAR	32 ANOS	127.750	0,229	0,183	0,412	*	*	18.502.000	14.804.835	33.306.835	
USEPA (1998)	32 ANOS	127.750	*	*	*	0,05	170,00	17.332.601	17.332.601	34.665.202	
LANDGEM 3.02	32 ANOS	127.750	*	*	*	0,05	170,00	15.882.146	15.882.146	31.764.292	
IPCC (1996)	32 ANOS	127.750	*	*	*	0,05	85,91	18.723.441	18.723.441	37.446.882	
ÁREAS SELECIONADAS DO ATERRO	ÁREA 1 (ATÉ 2 ANOS)	ÁREA 2 (ATÉ 6 ANOS)			ÁREA 3 (MAIS DE 6 ANOS)		TOTAIS PARCIAIS DA EMISSÃO DE CH ₄ NAS CAMPANHAS DE ENSAIOS		GÁS METANO EMITIDO NO ATERRO	GÁS CARBÔNICO EMITIDO NO ATERRO	BIOGÁS EMITIDO NO ATERRO
FASES PRINCIPAIS DE BIODEGRADAÇÃO	AJUSTE INICIAL - TRANSIÇÃO - ACIDOGÊNICA - METANOGÊNICA	METANOGÊNICA			MATURAÇÃO						
CAMPANHAS EXPERIMENTAIS	EMISSÃO CH ₄ NA SUPERFÍCIE	EMISSÃO CH ₄ POR DRENOS	EMISSÃO CH ₄ NA SUPERFÍCIE	EMISSÃO CH ₄ POR DRENOS	EMISSÃO CH ₄ NA SUPERFÍCIE	EMISSÃO CH ₄ POR DRENOS	EMISSÃO CH ₄ NA SUPERFÍCIE	EMISSÃO CH ₄ POR DRENOS	EMISSÃO TOTAL DE CH ₄	EMISSÃO TOTAL DE CO ₂	EMISSÕES TOTAIS CH ₄
	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)	(Nm ³ /ano)
PRIMEIRA CAMPANHA	5.530.067	241.776	8.748.463	1.666.152	*	654.372	14.278.530	2.562.300	16.840.830	16.840.830	33.681.660
SEGUNDA CAMPANHA	4.260.398	1.176.817	8.292.580	370.335	1.939.741	207.496	14.492.719	1.754.648	16.247.367	16.730.419	32.977.786
TERCEIRA CAMPANHA	6.292.424	1.201.337	8.644.102	252.171	2.640.162	59.907	17.576.688	1.513.415	19.090.103	17.446.644	36.536.747

4.8.1. Considerações finais sobre a aplicação do modelo triangular de Tchobanoglous *et al*

O modelo triangular (TCHOBANOGLIOUS *et al* 1993), estimou para o aterro controlado de Londrina, no ano de 2010, o volume de 33.306.835 Nm³/ano de biogás produzido. Do valor estimado para o biogás, 55,5% do volume foi calculado como sendo gás metano e 44,5% como sendo gás carbônico.

A aplicação da metodologia matemática sugerida por Tchobanoglous *et al* (1993) iniciou-se com a adoção de uma composição gravimétrica para o aterro de Londrina e a aplicação de umidades típicas obtidas na literatura para os componentes RSD.

Devido à ausência de dados sobre a composição gravimétrica dos RSD produzidos no município de Londrina, a análise da amplitude dos resultados foi realizada por meio de

cenários com composições gravimétricas prováveis. Verificou-se que, para os quantitativos de RSD depositados no aterro de Londrina e para as composições gravimétricas estimadas nos cenários, a aplicação do modelo exibiu diferenças entre 35.334.957 Nm³/ano e 27.916.035 Nm³/ano, perfazendo de 21% em termos percentuais. Observou-se preliminarmente que, devido à escolha de uma composição gravimétrica típica para o Brasil, as taxas específicas teóricas dos RSD no país podem apresentar um perfil característico.

Outro fator que justificou a utilização do modelo triangular na quantificação do biogás foi a possibilidade de quantificação da emissão do gás carbônico, calculada a partir da própria taxa específica teórica de produção do gás. Nos outros modelos teóricos o volume de gás carbônico foi estimado de forma simplificada como sendo igual ao volume total do gás metano.

Com relação à separação dos componentes em lentamente e rapidamente biodegradáveis, observou-se que a maior taxa específica teórica de produção de gás metano foi registrada para os componentes rapidamente biodegradáveis. Isto se justifica pelo fato desses componentes apresentarem ampla parcela de restos alimentares. Entretanto, devido o modelo adotar uma configuração triangular com quinze anos de duração para os componentes lentamente biodegradáveis, o somatório padronizado dessa parcela propiciou maior geração de gases que a outra.

4.8.2. Considerações finais sobre a aplicação do modelo USEPA

O modelo USEPA (1998) estimou para o aterro controlado de Londrina o volume de 34.665.202 Nm³/ano de biogás no ano de 2010. A parcela de gás carbônico foi calculada admitindo-se que representasse 50% do volume de biogás.

O potencial de geração de metano (L_0) sugerido pela USEPA e pelo Banco Mundial (170 m³ CH₄/ton. RSD) é admitido pelo Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia (BANCO MUNDIAL, 2003) como um valor típico. Mesmo diante do fato da variável considerar em seu bojo um número considerável de incertezas, o volume final de biogás obtido mostrou-se próximo ao dos outros modelos teóricos para o ano de 2010.

A constante de geração de metano (k), admitida com valor de $0,05 \text{ ano}^{-1}$, também é avaliada como um parâmetro adequado pelo Banco Mundial e pela USEPA. O valor para a referida taxa foi sugerido inclusive pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996).

O modelo USEPA mostrou configuração gráfica aceitável tanto no seguimento crescente como no seguimento decrescente. A partir do encerramento das operações do aterro controlado de Londrina em 2010, a configuração gráfica apresentou queda exponencial. O modelo calculou que no ano de 2025 o aterro continuaria produzindo gases, mesmo que em quantidade pequena em relação ao pico da produção.

4.8.3. Considerações finais sobre a aplicação do software Landgem 3.02

O programa Landgem 3.02 (USEPA, 2005) registrou, para o volume de biogás emitido no aterro controlado de Londrina no ano de 2010, o valor de $31.764.292 \text{ Nm}^3/\text{ano}$. O programa avalia as parcelas de gás metano e gás carbônico, em volume, como sendo 50% do volume total de biogás.

A crítica do programa feita pela USEPA (2005) argumenta pequenas diferenças para o modelo USEPA (1998), considerando o software Landgem 3.02 mais aprimorado. O valor final estimado mostrou essas diferenças, pois as variáveis utilizadas para entrada de dados no programa foram iguais às do modelo USEPA. O valor do potencial de geração de metano (L_0) utilizado foi de $170 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{ton. RSD}$ e a constante de geração de metano (k) foi admitida com valor de $0,05 \text{ ano}^{-1}$. Cabe lembrar que foi utilizada a mesma quantidade de RSD para o aterro de Londrina em todos os modelos teóricos.

Apesar do valor estimado de biogás para o ano de 2010 mostrar-se menor que o valor estimado pelo modelo USEPA (1998), o valor previsto para o ano de 2020 foi maior no software Landgem 3.02. Deve-se considerar que os dois modelos foram desenvolvidos conforme as condições de clima e as características dos RSD dos Estados Unidos. A aplicação dos modelos teóricos para previsão de biogás produzido pode apresentar diferenças significativas em outros países. Ainda que as variáveis utilizadas no modelo estejam em consonância com as características de alguns países, a curva matemática que estima a produção pode não representar o fenômeno em outras regiões.

4.8.4. Considerações finais sobre a aplicação do modelo de primeira ordem do IPCC

O modelo de primeira ordem sugerido pelo Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC, 1996) apresentou o maior resultado estimativo entre os modelos teóricos selecionados, com o valor de 37.446.882 Nm³/ano de biogás no ano 2010. Os valores de gás metano e gás carbônico foram estimados como sendo 50% cada do volume total de biogás.

O principal atributo na aplicação do modelo foi o detalhamento para o cálculo do valor do potencial de geração de metano dos RSD. Entretanto, não existiam dados do aterro controlado de Londrina para os valores de COD (carbono orgânico degradável) e COD_F (fração de carbono orgânico degradável assimilada). Necessitou-se, assim, a adoção dos parâmetros médios sugeridos pelo IPCC e a consequente anuência de qualquer imprecisão nos resultados finais.

Para a constante de geração de metano (k) o IPCC sugeriu o mesmo valor utilizado no modelo USEPA, ou seja, 0,05 ano⁻¹. O valor do potencial de metano (L₀), calculado para o aterro de Londrina a partir dos coeficientes de COD e COD_F sugeridos pelo IPCC, resultou em 85,91 m³ CH₄/ton. RSD. O número é inferior ao sugerido pelo Banco Mundial (2003) e USEPA (1998). Ainda assim, os valores totais calculados para a emissão de gás metano no aterro controlado de Londrina se posicionaram próximos aos calculados pelos outros modelos teóricos.

A configuração gráfica do modelo de primeira ordem do IPCC (1996) mostrou-se com formato parabólico e com crescimento exponencial. O modelo não possibilitou a previsão dos gases emitidos a partir do fechamento, tornando-se este um fator limitador de utilização do mesmo.

4.8.5. Considerações finais sobre a primeira campanha de medidas

A emissão de biogás calculada na primeira campanha de medidas totalizou 33.681.660 Nm³/ano. A parcela de gás carbônico foi calculada com base no valor obtido para o gás metano, considerando que representou 50% do biogás.

A primeira campanha de medidas apresentou a maior média geral de emissão superficial de gás metano das três campanhas: 13,9 NL/h.m², ou, em termos de vazão mássica,

238,3g/dia.m². O valor foi justificado como tendo sido motivado por ensaios de superfície realizados sobre bolhas de biogás (MACIEL *et al*, 2009). A campanha foi considerada preliminar devido ao limite amostral de ensaios com placa estática de fluxo. Com relação aos drenos verticais, a campanha deixou de avaliar somente um dos doze drenos existentes na ocasião.

A quantificação final da emissão de biogás mostrou valores intermediários entre a segunda e a terceira campanha de medidas. Caso todas as áreas tivessem sido contempladas com ensaios de superfície, a primeira campanha poderia apresentar maior valor de emissão de biogás.

Os drenos verticais existentes na primeira campanha do aterro controlado de Londrina totalizaram, em termos de vazão de gás metano, 2.562.300 Nm³/ano. O valor representou 15,2% do total de emissões de gás metano quantificadas para a primeira campanha. O percentual demonstrou a pequena parcela de gás metano que vaza pelos drenos verticais em relação ao gás metano que vaza pela superfície do aterro, o que foi confirmado nas outras duas campanhas.

A área 2 (55.328 m²), com RSD depositados até 6 anos, apresentou maior vazão de gás metano por drenos que as outras áreas. Isto se verificou por esta área conter um dreno de vazão elevada (DV-07). O DV-07 apresentou vazão de gás metano maior que a soma das vazões de gás nos outros drenos. A predominância das emissões pelo DV-07 foi verificada novamente na segunda campanha de medidas, apesar das reformas efetuadas no dreno para adaptação de um queimador em seu extremo. O estrangulamento do dreno para colocação do queimador pode ter causado elevação da perda de carga para a saída dos gases.

A área 1 (42.809m²), com RSD depositados até dois anos, apresentou emissão de gás metano de 34,3% do total de emissões. O valor de emissão de metano na área 2 representou 61,8% das emissões na primeira campanha. O percentual elevado pode ser explicado pela fase de biodegradação dos RSD da área 2, considerada fundamentalmente metanogênica pela idade dos resíduos existentes. Cabe ressaltar que a área 3 não apresentou resultados na primeira campanha de medidas, por não terem sido realizados ensaios em sua superfície.

O valor total de emissões de gás metano para o aterro de Londrina na primeira campanha foi de 16.840.830 Nm³/ano, considerando a soma das emissões superficiais e as emissões pelos drenos existentes no aterro.

4.8.6. Considerações finais sobre a segunda campanha de medidas

A segunda campanha de medidas calculou para o ano de 2010 um volume de biogás de 32.977.786 Nm³/ano. A parcela de gás metano representou 49,3% da composição do biogás e a parcela de gás carbônico representou 50,7%.

A média geral das emissões superficiais na segunda campanha de medidas foi de 10,24 NL/h.m². Em termos de vazão mássica, o valor equivale a 175,5 g/dia.m², a menor média geral das três campanhas de medidas. A justificativa para o menor valor das três campanhas se orientou para as condições climáticas da época, com a campanha se realizando após longo período de estiagem. O quadro 4.29 possibilita verificar o índice de pluviosidade dos anos de 2009 e 2010.

Quadro 4.29: Valores de precipitação nos anos de 2009 e 2010

PRECIPITAÇÕES DOS ANOS DE 2009 E 2010 (mm)												
ANO	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
2009	279,3	267,2	111,9	41,8	76	108,2	243,5	85	212	396,3	250,1	254,2
2010	352,4	171,7	257,7	159,9	71,4	17,7	33,1	30,4	126,2	171,8	*	*

Fonte: Boletim Analítico Anual – IAPAR (2010)

A primeira campanha aconteceu em meados de Outubro de 2009, em meio à primavera e saindo de um inverno atípico de chuvas. A segunda campanha se realizou após quatro meses de baixa pluviosidade; apenas 152,6 milímetros nos meses de maio a agosto.

Os drenos verticais existentes no aterro de Londrina na segunda campanha de medidas totalizaram, em termos de vazão de gás metano, 1.754.648 Nm³ CH₄/ano. O valor representa 10,8% do valor total de emissões de gás metano obtido na segunda campanha. A participação da emissão de gás metano por drenos verticais diminuiu em relação à primeira campanha, apesar do incremento de 10 drenos verticais entre as duas campanhas. A área 1 (51.525 m²) mostrou maior vazão de gás metano nos drenos que as outras áreas (1.176.817 Nm³/ano). Isso se verificou porque a operadora do aterro criou dez novos drenos verticais nessa área. Além disso, a operadora desativou três drenos verticais nas áreas 2 e 3.

Com relação às emissões superficiais totais de gás metano pelo aterro de Londrina, observou-se novamente a área 2 (50.506 m²) como de maior contribuição, perfazendo 57,2% das emissões. A área 1 (51.535 m²) foi responsável por 29,4% do gás metano emitido e a área 3 (49.852 m²) participou com 13,4% dessas emissões.

A área 3 se mostrou com características de vários anos sem operação, constatada pelos taludes com níveis sobrepostos, resultados da deposição de RSD ao longo dos anos. Por esse motivo, foi classificada como área onde os RSD tinham idade acima de 6 anos, podendo ultrapassar quinze anos. Os valores de emissões de gás metano obtidas para a área confirmaram a classificação proposta para área 3, indicando que os RSD depositados estão em fase de maturação.

O valor total de emissões de gás metano para o aterro, obtido na segunda campanha de ensaios, foi de 16.247.367 Nm³ CH₄/ano, considerando a soma das emissões superficiais e as emissões pelos drenos existentes no aterro. O valor obtido se mostrou inferior ao valor obtido na primeira e terceira campanhas.

4.8.7. Considerações finais sobre a terceira campanha de medidas

A terceira campanha de medidas registrou volume de biogás de 36.536.747 Nm³/ano. O volume calculado de gás metano representou 52,2% da composição do biogás e o volume calculado de gás carbônico representou 47,8% dessa composição.

A média geral dos fluxos volumétricos superficiais obtidos nos ensaios de superfície foi de 12,72 NL/h.m², ou 218,1 g/dia.m² em termos de vazão mássica. O valor médio geral foi superior ao da segunda campanha de medidas e inferior ao da primeira campanha. O motivo atribuído para o incremento de emissão de biogás em relação à segunda campanha alinhou-se novamente com as condições climáticas na ocasião da campanha. Pelo quadro 4.29 verifica-se que a terceira campanha, realizada nos últimos três dias de outubro e dois primeiros dias de novembro, acumulou 298 milímetros de precipitação a partir da segunda campanha.

A emissão de gás metano pelos drenos teve a menor participação (7,9%) das campanhas, apresentando o valor de 1.513.415 Nm³/ano. Observou-se grande variabilidade nas

emissões por drenos, que pode ser oriunda de diversos fatores. A velocidade do vento no aterro pode influenciar a vazão de gases nos drenos e mesmo o fluxo da superfície. Velocidades altas podem criar gradientes de pressão, fazendo com que a pressão no interior da massa de lixo empurre o gás de forma mais efetiva pelo tubo de escape ou pela superfície. Na terceira campanha de medidas, no dia de leitura dos drenos, a velocidade dos ventos era sensivelmente menor que na segunda campanha de medidas.

A área 1 mostrou maior vazão de gás metano por drenos que as outras áreas (1.201.337 Nm³/ano), motivado fundamentalmente pela maior rede de drenos instalados e alinhando-se com os valores da segunda campanha de medidas. A área 2, com apenas um dreno (DA-07), permaneceu com a segunda maior vazão (252.171 Nm³/ano). Na área 3 a vazão de biogás através dos drenos caiu bruscamente (59.907Nm³/ano), inclusive com a cessação das emissões através do dreno DA-09.

Opostamente aos drenos, as emissões superficiais aumentaram nas três áreas do aterro com relação à segunda campanha de medidas. A área 2 (50.506 m²) novamente apresentou maior contribuição no contexto das emissões superficiais totais de gás metano, participando com 49,2% (8.644.102 Nm³/ano). A área 1 (51.535 m²) registrou parcela de 35,8% (6.292.424 Nm³/ano) das emissões totais e a área 3 (49.852 m²), contribuiu com 15,0% (2.640.162 Nm³/ano) do total de emissões de gás metano.

As emissões totais de gás metano na ocasião da terceira campanha foram de 19.090.103 Nm³/ano. Durante a terceira campanha observou-se maior quantidade de emissões superficiais, tanto por meio dos ensaios como, sensivelmente, pelo odor do gás metano presente por sobre toda camada superficial do aterro.

Com relação às chuvas, verificou-se no aterro que precipitações intensas em curto período de tempo saturam rapidamente a camada de superfície e, provavelmente, penetram a massa de lixo. Com relação à aceleração do processo de biodegradação dos RSD no aterro após as precipitações, o fator só seria passível de comprovação por meio de pesquisa específica.

CAPÍTULO V – CONCLUSÕES FINAIS

- As medições realizadas nas três campanhas de medidas registraram volume de emissão de biogás de 33.681.660 Nm³/ano, 32.977.786 Nm³/ano e 36.536.747 Nm³/ano, respectivamente. A média das emissões de biogás obtidas nas três campanhas foi de 34.398.731 Nm³/ano.
- Com relação ao gás metano, as medições realizadas nas três campanhas de medidas indicaram valores de emissão de 16.840.830 Nm³/ano, 16.247.367 Nm³/ano e 19.090.103 Nm³/ano, respectivamente. A média das emissões de gás metano das três campanhas foi de 17.392.767 Nm³/ano, representando em termos percentuais, 50,6% do volume médio de biogás nas três campanhas.
- Os modelos matemáticos quantificaram o biogás produzido no aterro desde o início das operações até o ano de encerramento das atividades em 2010, perfazendo 32 anos de operação do aterro controlado de Londrina. Para o ano de 2010, o modelo triangular quantificou em termos de volume o valor de 33.306.835 Nm³/ano de biogás, o modelo USEPA (1998) calculou 34.665.202 Nm³/ano de biogás, o software Landgem 3.02 registrou 31.764.292 Nm³/ano de biogás e o modelo IPCC (1996) mostrou o valor de 37.446.882 Nm³/ano de biogás. A média calculada para os modelos teóricos foi de 34.295.802 Nm³/ano de biogás produzidos pelo aterro.
- Considerando somente o gás metano avaliado pelos modelos matemáticos, o modelo triangular apresentou volume de 18.502.000 Nm³/ano de metano para o ano de 2010, o modelo USEPA (1998) exibiu 17.332.601 Nm³/ano de metano, o software Landgem 3.02 registrou 15.882.146 Nm³/ano de metano e o modelo IPCC (1996) registrou 18.723.441 Nm³/ano de gás metano. A média calculada para a produção de gás metano por meio dos modelos teóricos foi de 17.610.047 Nm³/ano.
- A utilização de modelos matemáticos para avaliar o biogás produzido pelo aterro controlado de Londrina possibilitou estimar o volume de biogás que vazaria nos próximos anos, mas exibiu grande diversidade de valores. Para o ano de 2020, o modelo triangular calculou o volume de 2.470.417 Nm³/ano, o modelo USEPA (1998) calculou 17.574.870 Nm³/ano de biogás, o software Landgem avaliou que o aterro

produziria 19.266.017 Nm³/ano de biogás e o modelo IPCC (1996) não permitiu tal estimativa.

- As campanhas de medidas realizadas no aterro controlado de Londrina mostraram que, em média, 15.449.312 Nm³/ano de gás metano vaza pela camada de cobertura existente na superfície do aterro, representando 88,8% da emissão média total do gás. A emissão de gás metano média medida nos drenos verticais foi de 1.943.454 Nm³/ano. O valor representa somente 11,2% da média total das emissões do gás, demonstrando a ineficácia do sistema de drenagem do aterro.
- As emissões superficiais médias de gás metano obtidas a partir do parcelamento do aterro controlado de Londrina em três áreas resultaram em 5.360.963 Nm³/ano para a área 1, 8.561.715 Nm³/ano para a área 2 e 2.289.951 Nm³/ano para a área 3. Em termos percentuais, a média da área 1 representou 33,1% das emissões pela superfície do aterro, a área 2 representou 52,8% das emissões superficiais e a área 3 representou 14,1% dessas emissões. Os valores médios das emissões superficiais de gás metano em suas respectivas áreas seguiram a seleção inicial dessas áreas conforme a idade dos resíduos sólidos depositados e suas respectivas fases de biodegradação, apesar de ser conhecido que o biogás pode percolar de forma aleatória no interior da massa de lixo do aterro.
- Os drenos verticais apresentaram emissões médias de gás metano, em relação à área selecionada em que estavam inseridos, com valores de 873.310 Nm³/ano na área 1, 762.886 Nm³/ano na área 2 e 307.258 Nm³/ano na área 3. Os motivos podem se orientar para a desigualdade na quantidade de drenos por área e a ineficácia do sistema interno de drenagem. Constatou-se que a área 2, com apenas um dreno vertical (DV-07), representou 39,2% das emissões por drenos e a área 1, com quinze drenos efetivos na segunda e terceira campanhas de medidas, representou 44,9% da emissões médias de gás metano por drenos. A área 3 representou 15,8% das emissões médias de gás metano por drenos, apresentando drenos em aparente processo de extinção para a emissão de biogás.
- Nos resultados obtidos para a geração de biogás utilizando os modelos matemáticos teóricos, observou-se que a diferença entre o maior valor (IPCC, 1996) e o menor valor (Landgem 3.02) se estabeleceu em termos percentuais em 17,9%. O valor pode ser avaliado como relativamente pequeno, considerando que as metodologias

apresentam diferenças significativas no manuseio das variáveis diretamente ligadas à biodegradação anaeróbia.

- As campanhas de medidas registraram diferença de 9,0% no volume de biogás emitido pelo aterro entre o maior valor (terceira campanha) e o menor valor (segunda campanha). O valor percentual da diferença é inferior ao registrado na mesma análise para os modelos teóricos.
- Comparando os valores médios de biogás calculados pelas campanhas de medidas (emissão de biogás no aterro) e pelos modelos matemáticos (geração de biogás no aterro), a média obtida pelas campanhas de medidas (34.398.731 Nm³/ano) mostrou valor ligeiramente superior à média obtida pelos modelos matemáticos (34.295.802 Nm³/ano). Realizando a mesma comparação para o gás metano, o valor médio obtido para os modelos matemáticos utilizados (17.610.047 Nm³/ano) registrou-se superior ao valor médio das emissões de gás metano (17.392.767 Nm³/ano) no aterro controlado de Londrina.

SUGESTÕES PARA PRÓXIMAS PESQUISAS

1. Avaliar a composição física dos resíduos sólidos gerados no município de Londrina, considerando todas as variáveis passíveis para o estudo.
2. Compor dados históricos dos valores quantitativos de resíduos sólidos produzidos no município de Londrina, considerando as políticas administrativas adotadas e as empreiteiras envolvidas nas diversas gestões.
3. Monitorar a emissão de gases no aterro controlado de Londrina a partir de 2010 a fim de obter a curva de decaimento das emissões.
4. Avaliar a influência das condições climáticas e das estações do ano na emissão de gases pelo aterro controlado de Londrina.
5. Estudar a espessura ideal da camada de cobertura para o solo argiloso de Londrina, verificando inclusive a taxa de oxidação de gás metano.
6. Verificar o comportamento das emissões de gases pelos drenos verticais a fim de aprimorar a metodologia utilizada.
7. Estudar a influência quantitativa de precipitações pluviais sobre a camada de cobertura e o ponto de saturação da mesma.
8. Avaliar a velocidade de resposta da biodegradação anaeróbia e da emissão de gases no aterro a partir das precipitações pluviais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 10.004/2004. *Resíduos Sólidos - Classificação*. Rio de Janeiro, (2004).

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE, (2009). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil – 2009*.

AUDIBERT, M.A.E. (2008). *O Desenvolvimento Urbano e a Problemática do Lixo em Londrina: Estudo de Caso*. MBA em Ciência Política e Desenvolvimento Estratégico. Faculdade Arthur Thomas. Londrina. Pr.

BANCO MUNDIAL, (2003). *Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe*. Disponível em: <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_po.htm>. Acesso em Julho/2010.

BORBA, S.M.P. (2006). *Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários – Estudo de Caso*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil.

BORJESSON, G.; SUNDH, I.; TUNLID, A.; SVENSSON, H. (1997). *Methane Oxidation in Landfill Cover Soils as Revealed by Potential Oxidation Measurements and Phospholipid Fatty Acid Analysis*. Soil Biology and Biochemistry. v. 30.

BRAZ, J.A.; SILVA, C.L. (2003). *Avaliação do Potencial Energético do Biogás de Aterro Sanitário Gerado pelos Resíduos Sólidos Domésticos do Município de Rio Claro*. 21º Congresso Brasileiro de engenharia Sanitária e Ambiental.

CATAPRETA, C.A.A. (2008). *Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.

CHERNICHARO C. A. L. (2000). *Reatores Anaeróbios - Cap. 2 - Fundamentos da Digestão Anaeróbia*. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte. Brasil.

COSSU, R.; MUNTONI, A.; CHIARANTINI, L.; MASSACCI, G.; SERRA, P.; SCOLLETTA, A.; STERZI, G. (1997). *Biogás Emission Measurements Using Static and Dynamic Flux Chambers and Infrared Methods*. Proceedings of The Sixth International Landfill Symposium. v. 4. Sardinia. Itália.

CZEPIEL, P.M.; MOSHER, B.; CRILL, P.M.; HARRISS, R.C. (1996). *Quantifying the Effect of Oxidation on Landfill Methane Emissions*. Journal of Geophysical Reserch. v. 101.

EL-FADEL, M.; FINDIKAKIS, A.N.; LECKIE, J.O. (1997). *Environmental Impacts of Solid Waste Landfilling*. Journal of Environmental Management. Asce 50.

ENSINAS, A.V. (2003). *Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP*. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas – Faculdade de Engenharia Mecânica. Campinas. Brasil.

FIGUEIREDO, F.F. (2009). *A Contribuição da Reciclagem de Latas de Alumínio para o Meio Ambiente Brasileiro*. Revistes Catalanes amb Accés Obert (RACO). Disponível em <http://www.raco.cat/index.php/Aracne/article/view/143143>

FRÉSCA, F.R.C.; PUGLIESI, E.; MASSUKADO, L.M.; SCHALCH, V. (2008). *Determinação da composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município de São Carlos-SP*. DAE Set/2008, pp. 48-71.

GUEDES, V.P. (2007). *Estudo do Fluxo de Gases Através do Solo de Cobertura de Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil.

INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ – IAPAR (2010). *Cartas Climáticas do Paraná*. Disponível em: <http://www.iapar.br/modules/conteudo/conteudo.php?conteudo=677>

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 1996). *Diretrizes del IPCC para los inventarios de gases de efecto invernadero, version revisada em 1996: Libro de Trabajo. Modulo 6 – Desperdicios*. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.htm> Acesso Julho/2010.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT, 1995). *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado*. IPT/CEMPRE. São Paulo. Brasil.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE, 2010). Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em novembro 2010.

JUCA, J.F.T; MONTEIRO, V.E.D.; OLIVEIRA, F.J.S.; MACIEL, F.J. (1999). *Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca*. III Seminário de Resíduos Sólidos Urbanos. Toledo. Paraná.

JUCA, J.F.T; MARIANO, M.O.H.; ALVES, M.C.M.; MACIEL, F.J.; BRITO, A. (2005). *Disponibilidade do Biogás em uma Célula do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca*. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

JUCA, J.F.T; FUCALE, S.P.; MACIEL, F.J. (2001). *Monitoramento Ambiental de Gases em Aterros de Resíduos Sólidos*. 21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.

JUNQUEIRA, F.F. (2000). *Análise de Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jóquei Club*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. Brasília. Brasil.

KAIMOTO, L.S.A; LEITE, E.F., COELHO, M.G. (2008). *Considerações sobre Aproveitamento do Biogás em Aterro Sanitário*. Relatório. São Paulo. Brasil.

LANDIM, P.M.B.; MONTEIRO, R.C.; CORSI, A.C. (2002). *Introdução à confecção de mapas pelo software Surfer*. Departamento de Geologia Aplicada. Universidade Estadual Paulista – Campus Rio Claro. 2002.

LANDIM, P.M.B. (2000). *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. Departamento de Geologia Aplicada. Universidade Estadual Paulista – Campus Rio Claro. 2000.

LOPES, W.S.; LEITE, V.D.; SOUSA, J.T.; JUNIOR, G.B.A.; SILVA, S.A.; SOUSA, M.A. (2002). *Influência da Umidade na Digestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos*. XXXVIII Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Cancún. México.

- LIMA, L.M.Q. (1995). *Lixo: Tratamento e Biorremediação*. Hemus. 3ª. ed. Campinas. Brasil.
- MACIEL, F.J. (2003). *Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/Pe*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- MACIEL, F.J. (2009). *Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- MACIEL, F.J.; JUCA J.F.T. (2009). *Avaliação Simplificada do Biogás no Aterro de Londrina/Pr. Relatório de Resultados*. Grupo de Resíduos Sólidos. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- MARIANO, M.O.H. (2008). *Avaliação da Retenção de Gases em Camadas de Cobertura de Aterros de Resíduos Sólidos*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- MATTEI, G.; ESCOSTEGUY, P.A.V. (2007). *Composição Gravimétrica de Resíduos Sólidos Aterrados*. Engenharia Sanitária Ambiental, v.12, n.3.
- MONTEIRO, V. E. D. (2003). *Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento do Aterro da Muribeca*. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. Brasil.
- PESSIN, N.; DE CONTO, S.M.; TELH, M; CADORE, J.; ROVATTI, D.; BOFF, R.E. (2005). *Composição Gravimétrica de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de Caso – Município de Canela – RS*. Instituto de Saneamento Ambiental. Universidade de Caxias do Sul.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE LONDRINA (2002). *Perfil do Município de Londrina*. Londrina: Prefeitura Municipal de Londrina. 2002. 159p.
- PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE LONDRINA (2009). *Plano de desativação e recuperação do atual aterro de Londrina*. Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Estadual de Londrina. Outubro 2009.
- QUITAUNA, (2010). *Quitaúna Serviços S/C Ltda*. Disponível em www.quitauna.com.br

REAL, J.L.G. (2005). *Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases*. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro. Brasil.

RUSSO, M.A.T; VIEIRA, J.M.P. (2005). *Modelo de Previsão da Produção de Biogás em Aterro Sanitário. Aplicação ao Aterro de Matosinhos*.

SILVA, T.N.; CAMPOS, L.M.S. (2008). *Avaliação da Produção e Qualidade do Gás de Aterro para Energia no Aterro Sanitário dos Bandeirantes - SP*. Engenharia Sanitária Ambiental. v 13. n.1.

SURIAN, J. G. (2002). *Relatório de Impacto Ambiental _RIMA: Central Metropolitana de Tratamento e Disposição Final de Resíduos de Ibioporã*. Ibioporã: RIMA, v.1.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (1993). *Integrated Solid Waste Management. Engeneering Principles and Management Issues*. Irwin MacGraw-Hill. 978p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA, 1998). *AP 42 Section 2.4 – Municipal Solid Waste Landfills, Related Information*. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/related/c02s04.html>> Acesso em Fevereiro/ 2010.

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/ttantw01/landfill/landflpg.html>> Acesso em Dezembro/ 2010.

VANCE, D.B. (1996). *Reações Redox nas Obras de Saneamento*. Tecnologias Ambientais, v.6, p. 24-25.

VT ENGENHARIA (2010). *VT Engenharia e Construções Ltda*. Disponível em www.vtengenharia.com.br.

ANEXO A

**PLANILHAS DE CÁLCULO DOS ENSAIOS DE SUPERFÍCIE NA SEGUNDA
CAMPANHA DE MEDIDAS**

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-01 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P01 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
08:35	0,4	0,8	0,0	20,2	23,0
08:40	0,6	0,9	0,0	20,2	24,0
08:55	0,6	0,9	0,0	20,1	25,0
09:00	0,8	1,0	0,0	20,0	25,0
09:05	0,8	1,1	0,0	20,2	26,0
09:10	0,9	1,1	0,0	19,9	26,0
09:15	0,9	1,3	0,0	19,5	26,0
09:20	1,0	1,5	0,0	19,5	26,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-01 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7654	630,68	25,45	0,008	0,040	0,064
0:05	5	716,0	273,15	96,7654	628,55	25,53	0,008	0,045	0,072
0:20	20	716,0	273,15	96,7654	626,44	25,62	0,008	0,045	0,072
0:25	25	716,0	273,15	96,7654	626,44	25,62	0,008	0,050	0,080
0:30	30	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,055	0,088
0:35	35	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,055	0,088
0:40	40	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,065	0,104
0:45	45	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,075	0,120

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-02 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P02 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
09:35	0,0	0,4	0,0	20,9	25,0
09:40	1,0	1,5	0,0	20,2	25,0
09:45	2,2	3,0	0,0	19,2	26,0
09:50	2,9	3,3	0,0	19,2	27,0
09:55	2,9	3,8	0,0	19,0	27,0
10:00	2,9	3,7	0,0	19,0	27,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-02 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7654	626,44	25,62	0,008	0,020	0,032
0:05	5	716,0	273,15	96,7654	626,44	25,62	0,008	0,075	0,120
0:10	10	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,150	0,241
0:15	15	716,0	273,15	96,7654	622,27	25,79	0,008	0,164	0,265
0:20	20	716,0	273,15	96,7654	622,27	25,79	0,008	0,189	0,305

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-03 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P03 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:05	0,4	1,0	0,0	20,3	25,0
10:10	0,7	1,8	0,0	19,8	26,0
10:15	1,0	2,4	0,0	19,5	28,0
10:20	1,8	3,9	0,0	18,7	31,0
10:22	2,2	4,9	0,0	18,1	31,0
10:25	3,0	6,0	0,0	17,6	32,0
10:30	4,0	7,2	0,0	16,9	34,0
10:35	5,2	9,0	0,0	15,9	34,0
10:40	6,8	11,0	0,0	14,9	34,0
10:45	7,8	12,0	0,0	14,4	34,0
10:50	8,8	12,6	0,0	14,0	35,0
10:55	9,6	12,6	0,0	13,8	36,0
10:58	10,6	13,2	0,0	13,3	37,0
11:00	11,2	13,6	0,0	13,1	37,0
11:05	12,2	14,6	0,0	12,4	38,0
11:10	14,0	16,6	0,0	11,6	39,0
11:15	16,0	18,0	0,0	10,7	39,0
11:20	17,0	18,0	0,0	10,6	39,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-03 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7654	626,44	25,62	0,008	0,050	0,080
0:05	5	716,0	273,15	96,7654	624,35	25,70	0,008	0,090	0,144
0:10	10	716,0	273,15	96,7654	620,20	25,88	0,008	0,119	0,193
0:15	15	716,0	273,15	96,7654	614,09	26,13	0,008	0,192	0,313
0:17	17	716,0	273,15	96,7654	614,09	26,13	0,008	0,241	0,393
0:20	20	716,0	273,15	96,7654	612,07	26,22	0,008	0,294	0,481
0:25	25	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,350	0,578
0:30	30	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,438	0,722
0:35	35	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,535	0,883
0:40	40	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,584	0,963
0:45	45	716,0	273,15	96,7654	606,12	26,48	0,008	0,611	1,011
0:50	50	716,0	273,15	96,7654	604,16	26,56	0,008	0,609	1,011
0:53	53	716,0	273,15	96,7654	602,21	26,65	0,008	0,636	1,059
0:55	55	716,0	273,15	96,7654	602,21	26,65	0,008	0,655	1,091
1:00	60	716,0	273,15	96,7654	600,27	26,74	0,008	0,701	1,172
1:05	65	716,0	273,15	96,7654	598,35	26,82	0,008	0,795	1,332
1:10	70	716,0	273,15	96,7654	598,35	26,82	0,008	0,862	1,444

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-04 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P04 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
11:35	0,8	1,1	0,0	20,0	33,0
11:45	2,2	1,8	0,0	19,3	34,0
11:55	2,4	2,0	0,0	19,3	34,0
12:00	2,4	2,2	0,0	19,0	34,0
12:05	2,7	2,5	0,0	18,8	34,0
12:10	2,7	2,7	0,0	18,6	34,0
12:15	2,8	2,9	0,0	18,6	34,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-04 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7654	610,08	26,31	0,008	0,054	0,088
0:10	10	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,088	0,144
0:20	20	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,097	0,160
0:25	25	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,107	0,177
0:30	30	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,122	0,201
0:35	35	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,131	0,217
0:40	40	716,0	273,15	96,7654	608,09	26,39	0,008	0,141	0,233

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-05 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P05 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
14:20	0,0	1,0	0,0	20,9	37,0
14:25	1,8	4,8	0,0	19,6	37,0
14:30	2,2	5,0	0,0	19,0	37,0
14:35	4,2	7,6	0,0	18,0	37,0
14:40	5,0	8,8	0,0	17,4	37,0
14:45	6,0	9,6	0,0	19,7	37,0
14:50	7,5	10,5	0,0	18,0	38,0
15:00	9,2	12,0	0,0	15,8	38,0
15:05	10,0	12,2	0,0	15,7	38,0
15:10	9,0	11,8	0,0	15,8	37,0
15:15	8,6	11,4	0,0	15,9	36,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-05 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,048	0,080
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,231	0,385
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,240	0,401
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,365	0,610
0:20	20	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,423	0,706
0:25	25	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,461	0,770
0:30	30	716,0	273,15	96,4987	598,62	26,81	0,008	0,503	0,843
0:40	40	716,0	273,15	96,4987	598,62	26,81	0,008	0,575	0,963

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-06 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P06 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
15:30	0,0	0,4	0,0	20,5	37,0
15:35	0,4	0,7	0,0	20,5	37,0
15:40	0,4	0,7	0,0	20,5	36,0
15:43	0,6	0,8	0,0	20,1	36,0
15:45	0,8	0,9	0,0	19,9	36,0
15:50	1,0	1,0	0,0	19,7	36,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-06 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,019	0,032
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	600,55	26,72	0,008	0,034	0,056
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	602,49	26,64	0,008	0,034	0,056
0:13	13	716,0	273,15	96,4987	602,49	26,64	0,008	0,039	0,064
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	602,49	26,64	0,008	0,043	0,072
0:20	20	716,0	273,15	96,4987	602,49	26,64	0,008	0,048	0,080

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-07 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P07 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
15:55	0,6	0,6	0,0	20,9	33,0
16:00	3,0	3,4	0,0	19,5	33,0
16:05	5,6	5,9	0,0	18,4	33,0
16:10	5,2	4,8	0,0	18,4	33,0
16:15	5,0	4,8	0,0	18,9	33,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-07 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	608,39	26,38	0,008	0,029	0,048
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	608,39	26,38	0,008	0,165	0,273
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	608,39	26,38	0,008	0,287	0,473

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-08 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P08 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
16:20	1,6	3,4	0,0	19,3	30,0
16:25	5,8	7,8	0,0	17,1	31,0
16:28	11,2	14,0	0,0	14,4	31,0
16:30	12,2	13,4	0,0	14,5	31,0
16:35	13,5	15,2	0,0	13,7	30,0
16:36	15,5	17,5	0,0	12,7	30,0
16:38	21,0	22,5	0,0	10,8	30,0
16:40	20,5	21,0	0,0	11,1	30,0
16:45	20,5	19,5	0,0	11,6	30,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-08 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	614,41	26,12	0,008	0,167	0,273
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	612,39	26,21	0,008	0,382	0,626
0:08	8	716,0	273,15	96,4987	612,39	26,21	0,008	0,686	1,123
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	612,39	26,21	0,008	0,656	1,075
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	614,41	26,12	0,008	0,747	1,220
0:16	16	716,0	273,15	96,4987	614,41	26,12	0,008	0,860	1,404
0:18	18	716,0	273,15	96,4987	614,41	26,12	0,008	1,106	1,805

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-09 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P09 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
16:50	0,0	0,7	0,0	20,5	28,0
16:55	0,6	1,2	0,0	20,1	28,0
17:00	0,6	1,0	0,0	19,8	28,0
17:05	0,6	1,1	0,0	19,6	28,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-09 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	618,50	25,95	0,008	0,035	0,056
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	618,50	25,95	0,008	0,059	0,096
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	618,50	25,95	0,008	0,049	0,080
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	618,50	25,95	0,008	0,054	0,088

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-10 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P10 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
17:10	0,0	0,4	0,0	20,1	27,0
17:15	0,8	1,1	0,0	18,6	27,0
17:20	2,2	2,6	0,0	18,6	27,0
17:25	3,0	4,0	0,0	17,8	27,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-10 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	620,56	25,86	0,008	0,020	0,032
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	620,56	25,86	0,008	0,055	0,088
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	620,56	25,86	0,008	0,129	0,209
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	620,56	25,86	0,008	0,199	0,321

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-11 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P11 - DATA: 06/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
17:40	0,0	0,6	0,0	20,6	24,0
17:45	0,4	1,1	0,0	20,2	24,0
17:50	0,8	1,9	0,0	19,9	25,0
17:55	1,0	2,5	0,0	19,6	25,0
18:00	1,6	3,3	0,0	19,9	25,0
18:05	2,2	3,7	0,0	19,3	25,0
18:10	2,6	4,0	0,0	18,5	25,0
18:15	3,0	4,3	0,0	18,4	25,0
18:20	3,4	4,6	0,0	18,0	24,0
18:25	3,6	4,7	0,0	18,2	24,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-11 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4987	626,82	25,60	0,008	0,030	0,048
0:05	5	716,0	273,15	96,4987	626,82	25,60	0,008	0,055	0,088
0:10	10	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,095	0,152
0:15	15	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,125	0,201
0:20	20	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,165	0,265
0:25	25	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,185	0,297
0:30	30	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,200	0,321
0:35	35	716,0	273,15	96,4987	624,72	25,69	0,008	0,215	0,345

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-12 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P12 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
08:30	0,0	0,4	0,0	20,5	20,0
08:35	0,0	0,6	0,0	20,3	20,0
08:40	0,0	0,7	0,0	19,8	22,0
08:45	0,4	0,9	0,0	19,4	23,0
08:50	0,6	1,1	0,0	19,1	23,0
08:55	0,6	0,9	0,0	19,0	23,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-12 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	636,87	25,20	0,008	0,020	0,032
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	636,87	25,20	0,008	0,031	0,048
0:10	10	716,0	273,15	96,7254	632,55	25,37	0,008	0,035	0,056
0:15	15	716,0	273,15	96,7254	630,41	25,46	0,008	0,045	0,072
0:20	20	716,0	273,15	96,7254	630,41	25,46	0,008	0,055	0,088

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-13 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P13 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
09:00	27,0	40,0	0,0	6,1	23,0
09:01	31,0	45,0	0,0	5,2	23,0
09:02	39,0	50,0	0,0	1,9	23,0
09:03	41,0	53,0	0,0	1,5	24,0
09:04	43,0	54,0	0,0	1,0	24,0
09:05	44,0	55,0	0,0	0,7	26,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-13 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	630,41	25,46	0,008	2,017	3,210
0:01	1	716,0	273,15	96,7254	630,41	25,46	0,008	2,269	3,611
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	630,41	25,46	0,008	2,522	4,012
0:03	3	716,0	273,15	96,7254	628,29	25,54	0,008	2,664	4,253
0:04	4	716,0	273,15	96,7254	628,29	25,54	0,008	2,714	4,333
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	624,09	25,71	0,008	2,746	4,413

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-14 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P14 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
09:23	3,6	0,0	1,0	14,9	49,0
09:24	4,4	0,0	2,0	14,7	49,0
09:25	5,0	0,0	2,0	14,4	49,0
09:27	5,2	0,0	2,0	14,1	50,0
09:28	5,2	0,0	2,0	14,0	51,0
09:29	5,4	0,0	2,0	13,9	51,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-14 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	579,54	27,69	0,008	0,000	0,000
0:01	1	716,0	273,15	96,7254	579,54	27,69	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	579,54	27,69	0,008	0,000	0,000
0:04	4	716,0	273,15	96,7254	577,74	27,78	0,008	0,000	0,000
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	575,96	27,86	0,008	0,000	0,000
0:06	6	716,0	273,15	96,7254	575,96	27,86	0,008	0,000	0,000

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-15 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P15 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
09:35	0,4	0,0	0,0	20,6	32,0
09:37	0,6	0,0	0,0	20,5	33,0
09:40	0,8	0,0	0,0	20,3	33,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-15 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	611,82	26,23	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	609,82	26,32	0,008	0,000	0,000
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	609,82	26,32	0,008	0,000	0,000

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-16 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P16 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:03	0,6	0,0	0,0	20,0	26,0
10:05	0,6	0,0	0,0	20,0	27,0
10:10	0,6	0,0	0,0	20,2	27,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-16 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	624,09	25,71	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	622,01	25,80	0,008	0,000	0,000
0:07	7	716,0	273,15	96,7254	622,01	25,80	0,008	0,000	0,000

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-17 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P17 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:13	0,0	0,3	0,0	20,9	27,0
10:15	0,4	0,9	1,0	20,9	27,0
10:20	0,8	1,8	3,0	20,3	27,0
10:25	1,2	2,6	4,0	20,1	28,0
10:30	1,4	3,0	5,0	19,9	28,0
10:35	1,8	3,7	7,0	19,7	28,0
10:40	2,2	4,0	7,0	19,6	28,0
10:45	1,6	2,9	5,0	19,9	28,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-17 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	622,01	25,80	0,008	0,015	0,024
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	622,01	25,80	0,008	0,045	0,072
0:07	7	716,0	273,15	96,7254	622,01	25,80	0,008	0,090	0,144
0:12	12	716,0	273,15	96,7254	619,95	25,89	0,008	0,129	0,209
0:17	17	716,0	273,15	96,7254	619,95	25,89	0,008	0,149	0,241
0:22	22	716,0	273,15	96,7254	619,95	25,89	0,008	0,184	0,297

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-18 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P18 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:48	0,5	1,0	0,0	20,5	29,0
10:50	2,8	4,2	0,0	19,6	31,0
10:53	8,6	11,4	0,0	16,2	31,0
10:55	9,2	13,0	16,0	16,0	32,0
11:00	1,2	1,8	0,0	19,9	32,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-18 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	617,90	25,97	0,008	0,049	0,080
0:02	2	716,0	273,15	96,7254	613,83	26,14	0,008	0,206	0,337
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	613,83	26,14	0,008	0,560	0,915
0:07	7	716,0	273,15	96,7254	611,82	26,23	0,008	0,636	1,043

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-19 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P19 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:27	1,0	0,9	0,0	20,3	29,0
10:30	3,6	3,0	0,0	19,2	29,0
10:33	4,0	3,6	0,0	18,6	30,0
10:35	5,0	4,2	0,0	18,2	30,0
10:37	6,4	5,3	0,0	17,9	30,0
10:40	7,4	6,1	0,0	17,4	31,0
10:42	8,2	6,8	0,0	17,0	31,0
10:45	10,0	8,2	0,0	16,5	31,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-19 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	617,90	25,97	0,008	0,044	0,072
0:03	3	716,0	273,15	96,7254	617,90	25,97	0,008	0,148	0,241
0:06	6	716,0	273,15	96,7254	615,86	26,06	0,008	0,177	0,289
0:08	8	716,0	273,15	96,7254	615,86	26,06	0,008	0,207	0,337
0:10	10	716,0	273,15	96,7254	615,86	26,06	0,008	0,261	0,425
0:13	13	716,0	273,15	96,7254	613,83	26,14	0,008	0,300	0,489
0:15	15	716,0	273,15	96,7254	613,83	26,14	0,008	0,334	0,546
0:18	18	716,0	273,15	96,7254	613,83	26,14	0,008	0,403	0,658

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-20 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P20 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
11:05	1,0	1,0	0,0	20,4	28,0
11:10	3,2	3,1	0,0	19,4	29,0
11:15	3,2	3,8	0,0	19,1	30,0
11:20	4,8	4,4	0,0	19,6	30,0
11:25	3,0	2,9	0,0	19,3	30,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-20 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,7254	619,95	25,89	0,008	0,050	0,080
0:05	5	716,0	273,15	96,7254	617,90	25,97	0,008	0,153	0,249
0:10	10	716,0	273,15	96,7254	615,86	26,06	0,008	0,187	0,305
0:15	15	716,0	273,15	96,7254	615,86	26,06	0,008	0,217	0,353

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-21 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P21 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
13:45	0,4	0,6	0,0	20,9	24,0
13:50	1,0	1,1	2,0	20,4	24,0
13:55	2,2	3,4	2,0	19,2	24,0
13:57	3,4	7,8	0,0	17,3	23,0
14:00	10,8	13,2	0,0	15,2	23,0
14:03	12,4	15,6	0,0	13,9	23,0
14:05	14,0	17,5	0,0	13,0	23,0
14:07	15,5	19,0	0,0	12,4	23,0
14:10	16,5	20,0	0,0	11,9	23,0
14:12	18,5	22,5	0,0	11,1	23,0
14:15	21,5	25,0	0,0	9,8	23,0
14:17	23,0	27,0	0,0	9,0	23,0
14:20	25,0	29,0	0,0	8,2	23,0
14:22	26,0	30,0	0,0	7,8	23,0
14:25	27,0	30,5	0,0	7,5	23,0
14:30	27,0	26,0	0,0	8,0	23,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-21 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,030	0,048
0:05	5	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,055	0,088
0:10	10	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,170	0,273
0:12	12	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	0,392	0,626
0:15	15	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	0,664	1,059
0:18	18	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	0,785	1,252
0:20	20	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	0,880	1,404
0:22	22	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	0,956	1,525
0:25	25	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	1,006	1,605
0:27	27	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	1,132	1,805
0:30	30	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	1,257	2,006
0:32	32	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	1,358	2,167
0:35	35	716,0	273,15	96,4587	628,68	25,53	0,008	1,459	2,327

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-22 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P22 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
14:45	0,0	0,0	0,0	21,5	22,0
14:47	1,0	0,6	0,0	21,0	22,0
14:50	1,2	0,7	0,0	19,9	22,0
14:52	1,8	0,9	0,0	19,5	22,0
14:55	2,6	1,2	0,0	19,2	22,0
14:57	2,4	0,9	0,0	19,5	22,0
15:00	2,2	0,8	0,0	19,5	22,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-22 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	630,81	25,44	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	96,4587	630,81	25,44	0,008	0,030	0,048
0:05	5	716,0	273,15	96,4587	630,81	25,44	0,008	0,035	0,056
0:07	7	716,0	273,15	96,4587	630,81	25,44	0,008	0,045	0,072
0:10	10	716,0	273,15	96,4587	630,81	25,44	0,008	0,061	0,096

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-23 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P23 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
15:14	18,6	11,5	5,0	6,9	44,0
15:16	21,0	11,7	6,0	6,6	44,0
15:18	21,5	11,9	6,0	6,4	45,0
15:20	21,5	12,0	6,0	6,3	46,0
15:21	21,5	12,0	6,0	6,2	46,0
15:22	21,5	12,2	6,0	6,2	47,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-23 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	587,05	27,34	0,008	0,540	0,923
0:02	2	716,0	273,15	96,4587	587,05	27,34	0,008	0,549	0,939
0:04	4	716,0	273,15	96,4587	585,20	27,42	0,008	0,557	0,955
0:06	6	716,0	273,15	96,4587	583,37	27,51	0,008	0,560	0,963
0:07	7	716,0	273,15	96,4587	583,37	27,51	0,008	0,560	0,963
0:08	8	716,0	273,15	96,4587	581,55	27,60	0,008	0,568	0,979

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-24 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P24 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
15:35	0,0	0,4	0,0	20,9	25,0
15:37	0,8	1,1	0,0	20,1	25,0
15:40	2,2	2,0	0,0	19,0	25,0
15:47	4,6	5,6	0,0	17,5	25,0
15:50	6,2	7,0	0,0	16,8	24,0
15:55	8,4	9,0	0,0	15,5	24,0
16:00	10,0	10,4	0,0	14,6	24,0
16:05	12,0	12,0	0,0	13,7	24,0
16:10	13,0	12,4	0,0	13,5	25,0
16:15	13,0	12,0	0,0	13,5	25,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-24 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,020	0,032
0:02	2	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,055	0,088
0:05	5	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,100	0,160
0:12	12	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,280	0,449
0:15	15	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,351	0,562
0:20	20	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,451	0,722
0:25	25	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,521	0,835
0:30	30	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,601	0,963

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-25 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P25 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
16:20	0,0	0,4	0,0	20,0	24,0
16:22	1,6	2,0	0,0	18,9	24,0
16:25	3,2	3,2	0,0	17,5	24,0
16:30	2,8	3,1	0,0	17,8	23,0
16:35	2,0	2,5	0,0	18,5	23,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-25 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,020	0,032
0:02	2	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,100	0,160
0:05	5	716,0	273,15	96,4587	626,56	25,61	0,008	0,160	0,257

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-26 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P26 - DATA: 07/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
16:37	1,2	0,6	0,0	20,2	25,0
16:40	2,0	1,0	0,0	19,7	25,0
16:47	7,4	4,7	0,0	16,5	25,0
16:50	10,0	6,8	0,0	14,7	25,0
16:52	12,0	8,4	0,0	13,7	25,0
16:55	14,5	10,4	0,0	12,3	25,0
16:58	15,5	11,4	0,0	11,5	26,0
17:00	17,0	12,4	0,0	10,8	26,0
17:02	17,5	13,2	0,0	10,4	26,0
17:05	19,0	14,2	0,0	9,8	26,0
17:07	20,0	14,6	0,0	9,4	26,0
17:10	20,5	15,6	0,0	8,8	26,0
17:12	21,5	16,2	0,0	8,5	26,0
17:15	22,0	16,6	0,0	8,2	26,0
17:20	22,0	16,5	0,0	8,2	26,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-26 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,030	0,048
0:03	3	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,050	0,080
0:10	10	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,235	0,377
0:13	13	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,340	0,546
0:15	15	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,420	0,674
0:18	18	716,0	273,15	96,4587	624,46	25,70	0,008	0,520	0,835
0:21	21	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,568	0,915
0:23	23	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,617	0,995
0:25	25	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,657	1,059
0:28	28	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,707	1,139
0:30	30	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,727	1,172
0:33	33	716,0	273,15	96,4587	622,37	25,79	0,008	0,777	1,252

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-27 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P27 - DATA: 17/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
09:54	0,8	1,2	0,0	20,1	40,0
09:56	1,2	1,5	0,0	20,0	40,0
09:58	1,4	2,0	0,0	19,7	42,0
10:00	1,8	2,3	0,0	19,4	42,0
10:02	2,4	3,0	0,0	19,1	42,0
10:04	3,0	3,5	0,0	18,7	43,0
10:06	3,2	3,7	0,0	18,5	43,0
10:08	3,8	4,3	0,0	18,2	42,0
10:10	4,2	4,6	0,0	18,0	42,0
10:12	4,4	4,8	0,0	17,9	43,0
10:14	4,6	5,1	0,0	17,7	42,0
10:16	5,0	5,3	0,0	17,5	42,0
10:18	5,2	5,5	0,0	17,3	42,0
10:20	5,6	5,8	0,0	17,1	43,0
10:22	6,0	6,1	0,0	16,9	43,0
10:24	6,4	6,4	0,0	16,6	43,0
10:26	6,8	6,6	0,0	16,5	44,0
10:28	7,0	6,8	0,0	16,3	44,0
10:30	7,0	7,0	0,0	16,2	43,0
10:32	7,0	7,0	0,0	16,2	44,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-27 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	95,8588	590,85	27,16	0,008	0,057	0,096
0:02	2	716,0	273,15	95,8588	590,85	27,16	0,008	0,071	0,120
0:04	4	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,094	0,160
0:06	6	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,108	0,185
0:08	8	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,141	0,241
0:10	10	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,164	0,281
0:12	12	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,173	0,297
0:14	14	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,202	0,345
0:16	16	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,216	0,369
0:18	18	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,225	0,385
0:20	20	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,240	0,409
0:22	22	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,249	0,425
0:24	24	716,0	273,15	95,8588	587,10	27,34	0,008	0,258	0,441
0:26	26	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,272	0,465
0:28	28	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,286	0,489
0:30	30	716,0	273,15	95,8588	585,24	27,42	0,008	0,300	0,514
0:32	32	716,0	273,15	95,8588	583,40	27,51	0,008	0,308	0,530
0:34	34	716,0	273,15	95,8588	583,40	27,51	0,008	0,317	0,546

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-28 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P28 - DATA: 17/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
10:45	0,0	0,0	0,0	20,9	44,0
10:47	0,6	0,0	0,0	20,2	45,0
10:49	0,6	0,0	0,0	20,0	46,0
10:51	0,8	0,0	0,0	19,6	46,0
10:53	1,0	0,0	0,0	19,4	46,0
10:55	1,2	0,0	0,0	19,1	47,0
10:57	1,4	0,0	0,0	19,0	47,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-28 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	95,8588	583,40	27,51	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	95,8588	581,56	27,60	0,008	0,000	0,000
0:04	4	716,0	273,15	95,8588	579,74	27,68	0,008	0,000	0,000
0:06	6	716,0	273,15	95,8588	579,74	27,68	0,008	0,000	0,000
0:08	8	716,0	273,15	95,8588	579,74	27,68	0,008	0,000	0,000
0:10	10	716,0	273,15	95,8588	577,93	27,77	0,008	0,000	0,000
0:12	12	716,0	273,15	95,8588	577,93	27,77	0,008	0,000	0,000

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-29 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P29 - DATA: 17/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
11:00	0,0	0,0	0,0	20,9	47,0
11:03	0,6	0,5	0,0	20,2	48,0
11:05	0,8	0,6	0,0	19,9	48,0
11:07	1,0	0,8	0,0	19,6	49,0
11:09	1,2	1,0	1,0	19,1	49,0
11:11	1,6	1,2	1,0	18,8	48,0
11:13	2,0	1,4	1,0	18,3	49,0
11:15	2,4	1,7	2,0	17,9	49,0
11:17	2,6	1,8	2,0	17,7	48,0
11:19	3,0	2,0	2,0	17,4	48,0
11:21	3,2	2,2	2,0	17,1	47,0
11:23	3,8	2,4	2,0	16,8	47,0
11:25	4,0	2,5	2,0	16,6	47,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-29 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	95,8588	577,93	27,77	0,008	0,000	0,000
0:03	3	716,0	273,15	95,8588	576,13	27,86	0,008	0,023	0,040
0:05	5	716,0	273,15	95,8588	576,13	27,86	0,008	0,028	0,048
0:07	7	716,0	273,15	95,8588	574,34	27,94	0,008	0,037	0,064
0:09	9	716,0	273,15	95,8588	574,34	27,94	0,008	0,046	0,080
0:11	11	716,0	273,15	95,8588	576,13	27,86	0,008	0,055	0,096
0:13	13	716,0	273,15	95,8588	574,34	27,94	0,008	0,064	0,112
0:15	15	716,0	273,15	95,8588	574,34	27,94	0,008	0,078	0,136
0:17	17	716,0	273,15	95,8588	576,13	27,86	0,008	0,083	0,144
0:19	19	716,0	273,15	95,8588	576,13	27,86	0,008	0,092	0,160
0:21	21	716,0	273,15	95,8588	577,93	27,77	0,008	0,102	0,177
0:23	23	716,0	273,15	95,8588	577,93	27,77	0,008	0,111	0,193

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-30 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P30 - DATA: 17/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
14:10	0,0	0,0	0,0	20,9	45,0
14:12	0,0	0,4	0,0	20,6	45,0
14:14	0,4	0,6	0,0	20,4	46,0
14:16	0,6	0,8	0,0	20,3	47,0
14:18	0,8	1,0	0,0	20,1	48,0
14:20	0,8	1,1	1,0	20,0	49,0
14:22	1,0	1,3	1,0	19,7	49,0
14:24	1,2	1,5	1,0	19,7	49,0
14:26	1,2	1,6	1,0	19,6	49,0
14:28	1,4	1,8	1,0	19,5	50,0
14:30	1,6	2,0	1,0	19,4	51,0
14:32	1,6	2,1	1,0	19,3	51,0
14:34	1,8	2,2	1,0	19,2	51,0
14:36	2,0	2,3	1,0	19,1	52,0
14:38	2,0	2,4	1,0	19,0	52,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-30 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	95,1922	577,52	27,79	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	95,1922	577,52	27,79	0,008	0,018	0,032
0:04	4	716,0	273,15	95,1922	575,71	27,88	0,008	0,028	0,048
0:06	6	716,0	273,15	95,1922	573,91	27,96	0,008	0,037	0,064
0:08	8	716,0	273,15	95,1922	572,13	28,05	0,008	0,046	0,080
0:10	10	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,050	0,088
0:12	12	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,059	0,104
0:14	14	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,068	0,120
0:16	16	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,073	0,128
0:18	18	716,0	273,15	95,1922	568,58	28,23	0,008	0,082	0,144
0:20	20	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,091	0,160
0:22	22	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,095	0,169
0:24	24	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,100	0,177
0:26	26	716,0	273,15	95,1922	565,09	28,40	0,008	0,104	0,185

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-31 – DADOS DE CAMPO

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO					
ENSAIO P31 - DATA: 17/09/2010					
Hora	CO ₂	CH ₄	H ₂ S	O ₂	T _{interna} (°C)
15:10	0,0	0,0	0,0	20,9	48,0
15:12	0,4	0,4	0,0	20,7	49,0
15:14	0,8	0,7	0,0	20,4	49,0
15:16	1,2	1,0	0,0	20,0	51,0
15:18	1,8	1,3	0,0	19,4	52,0
15:20	2,4	1,7	0,0	19,0	51,0
15:22	2,4	1,8	0,0	18,8	51,0
15:24	3,0	2,1	0,0	18,5	50,0
15:26	3,6	2,4	0,0	18,1	49,0
15:28	4,2	2,6	0,0	17,7	50,0
15:30	4,4	2,8	0,0	17,4	50,0
15:32	4,8	2,9	0,0	17,2	50,0
15:34	5,0	3,0	0,0	17,1	50,0

ENSAIO DE PLACA DE FLUXO P-31 – PLANILHA DE CÁLCULO

Tempo Decorrido	Minutos Decorridos	Densidade CH ₄ na CNTP (g/m ³)	Temperatura Absoluta (273,15K)	Pressão Atmosférica (kPa)	Densidade CH ₄ na temperatura e pressão local (g/m ³)	Volume CH ₄ na temperatura e pressão local (l/mol)	Volume da Placa de Fluxo (m ³)	Quantidade de CH ₄ na Placa (g)	Volume de CH ₄ na Placa (NI)
0:00	0	716,0	273,15	95,1922	572,13	28,05	0,008	0,000	0,000
0:02	2	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,018	0,032
0:04	4	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,032	0,056
0:06	6	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,045	0,080
0:08	8	716,0	273,15	95,1922	565,09	28,40	0,008	0,059	0,104
0:10	10	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,077	0,136
0:12	12	716,0	273,15	95,1922	566,83	28,31	0,008	0,082	0,144
0:14	14	716,0	273,15	95,1922	568,58	28,23	0,008	0,096	0,169
0:16	16	716,0	273,15	95,1922	570,35	28,14	0,008	0,110	0,193
0:18	18	716,0	273,15	95,1922	568,58	28,23	0,008	0,118	0,209
0:20	20	716,0	273,15	95,1922	568,58	28,23	0,008	0,127	0,225

ANEXO B

COORDENADAS DOS PONTOS DOS ENSAIOS DE SUPERFÍCIE

X – OESTE PARA LESTE / Y – SUL PARA NORTE

PRIMEIRA CAMPANHA DE MEDIDAS

ÁREA 1		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
EP-01	209,26	596,55
EP-02	112,94	582,67
EP-05	161,54	591,95

ÁREA 2		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
EP-03	228,94	220,80
EP-04	189,79	315,29

SEGUNDA CAMPANHA DE MEDIDAS

ÁREA 1		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
PT-01	169,66	535,04
PT-02	195,76	535,66
PT-03	210,35	524,61
PT-04	169,28	514,15
PT-05	133,39	474,55
PT-06	149,08	449,81
PT-07	151,07	514,70
PT-08	186,51	505,80
PT-09	165,26	564,85
PT-10	189,27	593,84
PT-11	133,90	618,10
PT-12	196,86	441,69
PT-13	227,14	505,50
PT-14	438,67	574,02
PT-15	425,87	593,80
PT-16	370,86	579,26
PT-17	217,85	486,39
PT-18	208,56	461,22
PT-19	199,71	477,44
PT-20	208,87	422,07
PT-21	129,71	430,55
PT-22	137,38	385,25

ÁREA 2		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
PT-23	111,20	325,92
PT-24	188,58	238,69
PT-25	247,30	197,65

ÁREA 3		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
PT-26	276,48	218,49
PT-27	276,67	373,60
PT-28	290,63	393,32
PT-29	288,56	422,00
PT-30	310,48	314,83
PT-31	310,69	220,08

TERCEIRA CAMPANHA DE MEDIDAS

ÁREA 1		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
P-01	135,52	602,43
P-02	149,03	574,00
P-03	179,98	590,29
P-04	229,38	615,42
P-05	226,62	587,74
P-06	218,89	550,27
P-07	177,31	539,38
P-08	167,88	526,74
P-09	168,16	509,74
P-10	206,12	525,02
P-11	166,23	473,79
P-12	146,77	489,14
P-13	112,64	559,02
P-14	186,65	457,30
P-15	132,40	458,85
P-16	129,95	410,27
P-17	132,85	387,64
P-18	134,25	364,14
P-19	195,33	355,26
P-20	201,15	393,70
P-21	202,78	421,16

ÁREA 2		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
P-22	280,71	544,34
P-23	255,60	539,87
P-24	246,97	510,91
P-25	224,78	470,01
P-26	219,84	419,07
P-27	223,98	247,93
P-28	233,99	222,43
P-29	192,79	235,11

ÁREA 3		
ENSAIO	COORDENADAS	
	X	Y
P-30	276,02	220,93
P-31	269,11	235,62
P-32	296,95	231,73
P-33	313,98	308,55
P-34	275,76	355,52
P-35	287,23	393,84
P-36	276,97	404,49