



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JULIO DE MESQUITA FILHO"
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E DA CONCENTRAÇÃO DO METANO PRESENTES
NOS GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO CLARO - SP

Sarita Magnan Antonio

Rio Claro (SP)

2012

SARITA MAGNAN ANTONIO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E DA
CONCENTRAÇÃO DO METANO PRESENTES NOS
GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO
CLARO - SP**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)
(2012)

SARITA MAGNAN ANTONIO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E DA
CONCENTRAÇÃO DO METANO PRESENTES NOS
GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO
CLARO - SP**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheira Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

Rio Claro (SP)
2012

604.6 Antonio, Sarita Magnan
A635a Análise da variação da vazão e da concentração do metano
presentes nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro -
SP / Sarita Magnan Antonio. - Rio Claro : [s.n.], 2012
58 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Trabalho de conclusão de curso (bacharelado - Engenharia
Ambiental) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de
Geociências e Ciências Exatas
Orientador: Marcus Cesar Avezum Alves de Castro

1. Resíduos. 2. Biogás. I. Título.

SARITA MAGNAN ANTONIO

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E DA CONCENTRAÇÃO DO
METANO PRESENTES NOS GASES GERADOS NO ATERRO
SANITÁRIO DE RIO CLARO - SP**

Trabalho de Formatura apresentado ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro (SP), da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Engenheira Ambiental.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Marcus Cesar Avezum Alves de Castro (orientador)
Prof. Dr. Valdir Schalch
Prof. Dr. Wellington Cyro de Almeida Leite

Rio Claro, 21 de novembro de 2012.

assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

*A minha mãe, que me apoiou
e me proporcionou os melhores meios
para eu completar mais esta etapa na minha vida*

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar agradeço às energias que regem o universo, nomeada por mim como Deus, que direciona minha vida em caminhos, pelos quais eu encontrei e encontro pessoas maravilhosas e, pelos quais, eu tenho certeza que me levarão para os meus melhores destinos.

Também agradeço à...

Minha mãe, Fátima Magnan, pessoa mais importante na minha vida. À ela é meu agradecimento especial, pois foi ela quem me proporcionou a base para meus degraus, os quais me fazem alcançar o topo onde estão meus objetivos de vida e minhas ambições.

Ao meu pai, Eros Antonio, o homem da casa, à minha irmã querida, Samara Antonio, e a todos os meus familiares, os quais, cada um de sua maneira, me apoiaram e incentivaram nesta etapa da minha vida, em especial minhas tias Lucia Magnan e Conceição Magnan.

Às minhas amigas de infância, Maria Flávia Lima, Maria Clara Bronzatto, Lais Satim, Mariana Lovo, Débora Coser, Amália Aló e Laís Montagnana, com as quais eu comprovei que nem a distância nem o tempo são capazes de destruir as amizades verdadeiras.

Ao anjo que Deus colocou na minha vida, Eduardo Almeida, meu melhor amigo, meu amor, meu porto seguro.

Aos meus colegas de sala da Engenharia Ambiental – turma 2008, a turma mais unida, na qual cada um respeitou ao outro e, dessa maneira, passamos 5 anos sem desentendimento e discussões. De maneira especial agradeço à Lívia Ribeiro, Amanda Costa, Bruno Zanatta, Marcos Destri, Lucas Vercellino e Claudio Souza.

Às minhas amigas de república, Elis Pacola, Luana Kwai, Rafaella Lange, Natasha Marques e Beatriz Pichinelli, (a agregada), que se tornaram minhas irmãs. Com elas eu descobri que existe família longe de casa. Foi com elas que passei os melhores momentos da minha vida, que jamais serão esquecidos e que deixarão saudade.

Ao meu professor orientador Marcus Castro, que além de resguardar toda esta pesquisa, acompanhou e colaborou para meu desenvolvimento profissional.

Ao meu grupo de pesquisa no aterro sanitário de Rio Claro – SP, Natasha Marques, Bruno Zanatta, Prof. Valdir Schalch, Prof. Wellington Cyro, Prof. Marcus Castro, juntos trabalhamos intensamente, trocamos conhecimentos, informações e experiências possibilitando uma pesquisa séria, sólida e com bons resultados.

Aos trabalhadores do aterro sanitário de Rio-Claro, Jorge Zuizke, Vilson de Lima, Maurício C. Trindade, Mario A. Andreatto, Antonio A. A. Maciel, que sempre nos recebem com respeito e educação.

À Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente de Rio Claro, em especial Regina Ferreira da Silva e Luiz Antonio Seraphim, que autorizaram o desenvolvimento da pesquisa no aterro sanitário e forneceram dados necessários à pesquisa.

A Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio e financiamento a esta pesquisa.

“Dividir conhecimento é multiplicar sabedoria”.

Ricardo Lenz Cesar

RESUMO

O estudo da geração do biogás gerado nos aterros sanitários auxilia no entendimento das relações existentes entre a produção de gás e outros parâmetros, como por exemplo, tempo de disposição dos resíduos e umidade e, dessa maneira, pode subsidiar o estudo de viabilidade para aproveitamento energético. Assim, este estudo tem como objetivo avaliar a interferência do tempo de disposição dos resíduos e da umidade (precipitação) na produção e composição do biogás gerado no aterro sanitário de Rio Claro – SP. Como resultado observou-se que, para o aterro sanitário estudado, a porcentagem média de metano presente no biogás variou de 49,9% a 54,7%. Verificou-se que a umidade (precipitação) e o tempo de disposição dos resíduos são parâmetros que não causam significativas alterações na concentração de metano presente no biogás. Porém, quando analisada a vazão do biogás, que teve como valor médio máximo de 152,86m³/h e valor médio mínimo de 15,47m³/h, observou-se grande interferência da umidade (precipitação) e do tempo de disposição dos resíduos, pois, os drenos de gás localizados em áreas do aterro mais recentes apresentaram maiores valores de vazão do que as áreas do aterro onde foi o início da disposição. Da mesma maneira, observou-se que na época de estiagem a vazão do biogás diminuiu em todos os drenos de gás analisados.

Palavras-chave: Biogás, Metano, Resíduos Sólidos Domiciliares, Aterro Sanitário.

ABSTRACT

The study of the generation of landfill gas contributes to the understanding of the relationship between gas production and other parameters, such as time of disposal of waste and moisture (rainfall) and, thus, can subsidize the viability study for energy. This study aims to evaluate the interference of the time of disposal of waste and moisture (rainfall) in the production and composition of biogas generated at the landfill in Rio Claro - SP. As a result it was observed that for the landfill studied, the average percentage of methane in biogas ranged from 49.9% to 54.7%. It was found that moisture (rainfall) and the time of waste disposal are parameters which do not cause significant changes in methane concentration in biogas. However, when analyzed the flow of biogas, which had the maximum average value of 152.86m³/h and minimum average value of 15.47m³/h was observed great interference of moisture (rainfall) and the time of disposal of waste, because well of gas located in newer areas of the landfill showed higher values of flow rate than the areas where the landfill was the beginning of the arrangement. The same way, it was observed that in the dry season flow of biogas decreased in all drains gas analyzed.

Keywords: Landfill Gas, Methane, Household Solid Waste, Landfill.

LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Destinação final de resíduos sólidos urbanos (t/dia)	21
Figura 2	IQR do Estado de São Paulo em 1997 e em 2011	22
Figura 3	Fases da decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários	23
Figura 4	Sequencia metabólica da digestão anaeróbia	24
Figura 5	Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário	25
Figura 6	Concentração de metano nos meses de abril e junho em um dos drenos estudados	28
Figura 7	Produção estimada de metano com parâmetros médios observados	32
Figura 8	Localização do município de Rio Claro-SP	34
Figura 9	Imagem da localização do aterro sanitário de Rio Claro	35
Figura 10	Coleta de lixiviado por caminhão-tanque para posterior recirculação na superfície do aterro	36
Figura 11	Recirculação de lixiviado na superfície do aterro com auxílio de caminhão-tanque	36
Figura 12	Fluxograma geral dos procedimentos metodológicos	37
Figura 13	Imagem do aterro sanitário de Rio Claro-SP com a localização dos drenos de gás	38
Figura 14	Imagem de um dos drenos de biogás na fase de construção, nos quais não foi possível medir o biogás	39
Figura 15	Subdivisão do aterro sanitário de Rio Claro-SP em subáreas de estudo	41
Figura 16	Avanço da ocupação do aterro sanitário de Rio Claro – SP e suas respectivas fases	42
Figura 17	Instrumento para análise da concentração do biogás	43
Figura 18	Procedimento de fechamento do dreno de gás para posterior medição.	44
Figura 19	Termo-anemômetro	45
Figura 20	Adaptadores para medição da velocidade do biogás	45
Figura 21	Termo-anemômetro inserido na chaminé para medição da velocidade do biogás	46
Figura 22	Valores de concentração de metano (%) no biogás dos drenos analisados	49
Figura 23	Variação da concentração do metano presente no biogás dos drenos estudados com a variação da precipitação no período estudado	51
Figura 24	Valores de vazão do biogás (m ³ /h) nos drenos analisados	53
Figura 25	Variação da vazão de biogás (m ³ /h) com a variação da precipitação	54

LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1	Participação dos materiais no total de RSU coletado no Brasil	20
Tabela 2	Características dos gases presentes no biogás	26
Tabela 3	Valores da produção de biogás para as amostras de resíduo dos biorreatores com diferentes umidades.	28
Tabela 4	Grupo de drenos a serem analisados	40
Tabela 5	Resultado das análises de concentração de gás metano (em porcentagem) presente no biogás dos drenos estudados	48
Tabela 6	Resultado das análises de vazão de biogás (em m ³ /h) presentes nos drenos estudados	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

MTC	Ministério da Ciência e Tecnologia
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
ABRELP	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
NBR	Norma Brasileira
CESTESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
IQR	Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos
AOV	Ácido Orgânico Volátil
pH	Potencial Hidrogeniônico
DQO	Demanda Química de Oxigênio
USEPA	United States Environmental Protection Agency
LandGEM	Landfill Gas Emission Model
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
COT	Carbono Orgânico Total
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
UGRHI	Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos
PCJ	Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá
Km	Quilômetros
mm	milímetros
m	metros
RAP	Relatório Ambiental Preliminar
SEPLADEMA	Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente
t	toneladas

GPS Global Positioning System

CEAPLA Centro de Análise e Planejamento Ambiental

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	17
2. OBJETIVOS.....	18
2.1 Objetivo Geral.....	18
2.2 Objetivos Específicos.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1 Resíduos Sólidos: Definição e disposição final.....	19
3.2 Degradação anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos.....	22
3.3 Fatores que influenciam na produção de biogás.....	26
3.4 A influência da recirculação do lixiviado na produção de biogás.....	30
3.5 Potencial Energético a partir do biogás de aterro sanitário.....	32
3.6 Características da área do aterro sanitário de Rio Claro – SP.....	33
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	37
4.1 Seleção dos drenos no aterro sanitário de Rio Claro-SP.....	37
4.2 Análise da composição do biogás.....	43
4.3 Procedimentos para medição da velocidade do biogás e cálculo da vazão.....	44
4.4 Forma de análise dos dados.....	47
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	48
6. CONCLUSÕES.....	56
7. RECOMENDAÇÕES.....	57
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, um dos impactos ambientais mais discutidos é o efeito estufa, causado pela emissão excessiva de gases como dióxido de carbono (CO_2) e metano (CH_4).

Segundo o Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa (MCT, 2009), o aterramento de resíduos sólidos no Brasil gera 7,8% do total de emissões de metano.

Em outro contexto, a quantidade de resíduos gerados cresce a cada dia devido ao aumento populacional somado a mudança dos hábitos de consumo, e o gerenciamento inadequado desses resíduos sólidos ainda é uma realidade no Brasil.

A falta de tratamento e/ou a disposição final inadequada dos resíduos podem causar problemas sanitários, ambientais e sociais, tais como a disseminação de doenças, a contaminação do solo e das águas subterrâneas e superficiais, a poluição do ar pelo gás metano, e o favorecimento da presença de catadores. Neste sentido, a maneira mais segura de disposição final de resíduos sólidos é o aterro sanitário.

Em aterros sanitários, a fração orgânica dos resíduos sólidos sofre um processo de decomposição na ausência de oxigênio e, desta maneira, os compostos orgânicos são convertidos em novos compostos, como o metano e o dióxido de carbono, que juntos formam o biogás.

Neste sentido, a coleta e o aproveitamento do biogás gerado em aterro sanitário composto por aproximadamente 50% de gás metano possui elevado poder calorífico e consiste em fonte de energia alternativa, além de reduzir os impactos ambientais.

Dessa maneira, o estudo do biogás gerado no processo de decomposição anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos auxilia no entendimento de relações existentes entre a produção de gás e outros parâmetros, como por exemplo, tempo de disposição dos resíduos, podendo subsidiar o estudo de viabilidade do aproveitamento energético.

Finalmente, a aprovação da Lei 12305, regulamentada pelo Decreto 7.404 de 23 de dezembro de 2010, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), a qual prevê a reciclagem e reaproveitamento dos resíduos e a extinção dos lixões, contribui para criar um novo cenário para a disposição final dos resíduos, com a possibilidade de concepções e projetos voltados ao aproveitamento energético.

Desse modo, a pesquisa tem por objetivo geral avaliar a vazão e a composição de metano e dióxido de carbono nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro nos diferentes períodos do ano.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O trabalho tem por objetivo geral avaliar a vazão e a composição de metano nos gases gerados no aterro sanitário de Rio Claro nos diferentes períodos do ano.

2.2 Objetivos Específicos

A presente pesquisa tem por objetivos específicos:

- Medir a concentração de metano (CH_4) em diferentes períodos do ano;
- Medir a vazão dos gases gerados em diferentes períodos do ano;
- Avaliar a correlação entre a vazão e a composição dos gases gerados em função do índice pluviométrico (umidade);
- Investigar a relação entre concentração e vazão com o tempo de disposição dos resíduos.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Resíduos Sólidos: Definição e disposição final

Segundo a Lei 12305, da PNRS, resíduo sólido é definido como

material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível.

Dentre os resíduos sólidos encontram-se os resíduos sólidos urbanos, os quais englobam os resíduos domiciliares, gerado nas residências, e os resíduos de limpeza urbana. Segundo a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico no ano de 2008 foram gerados cerca de 183.481t/dia de resíduos domiciliares, sendo a média nacional de geração de resíduos sólidos domiciliares por habitante é de 0,93 kg/habitante.dia (Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2010).

Os resíduos domiciliares no Brasil são predominantemente compostos por matéria orgânica, cenário diferente encontrado nos países desenvolvidos, como por exemplo, os Estados Unidos, onde a composição os resíduos sólidos domiciliares é composto predominantemente por materiais recicláveis (IPT, 2000).

Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais–ABERLPE, no ano de 2011, a porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos sólidos urbanos foi de 51,4% contra 31,9% de recicláveis e 16,7% de outros tipos de materiais. A Tabela 1 apresenta, em porcentagem, a participação de cada tipo de material que compõe os resíduos sólidos urbanos no Brasil.

Tabela 1. Participação dos materiais no total de RSU coletado no Brasil

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.610.499
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.275.012
Plástico	13,5	7.497.149
Vidro	2,4	1.332.827
Matéria Orgânica	51,4	28.544.702
Outros	16,7	9.274.251
TOTAL	100,0	55.534.440

Fonte: ABRELPE, 2011.

A grande quantidade de matéria orgânica na composição gravimétrica do resíduo brasileiro contribui significativamente para os impactos ambientais associados à disposição dos resíduos orgânicos em aterros sanitários, como geração de gases de efeito estufa e de líquidos percolados com elevado potencial de contaminação de solos e das águas superficiais e subterrâneos, geração de odores e atração de vetores de doenças. (CASTRO, 2001).

Segundo Frésca (2007) essa grande quantidade de matéria orgânica quando degradada gera gases do efeito estufa e líquidos percolados, que podem causar impacto ao meio ambiente. Dessa maneira torna-se fundamental a gestão correta dos resíduos sólidos urbanos.

Atualmente no Brasil a técnica adequada para a disposição final de resíduo sólido urbano no solo é o aterro sanitário, porém, a disposição de resíduos em aterros controlados e lixões é uma prática bastante comum. Segundo ABRELPE, no ano de 2011, 58,1% dos resíduos gerados, por dia, no Brasil foram enviados para aterros sanitários, enquanto 24,2% para aterros controlados e 17,7% para lixão. A Figura 1 apresenta as porcentagens de destino dos resíduos gerados no Brasil.

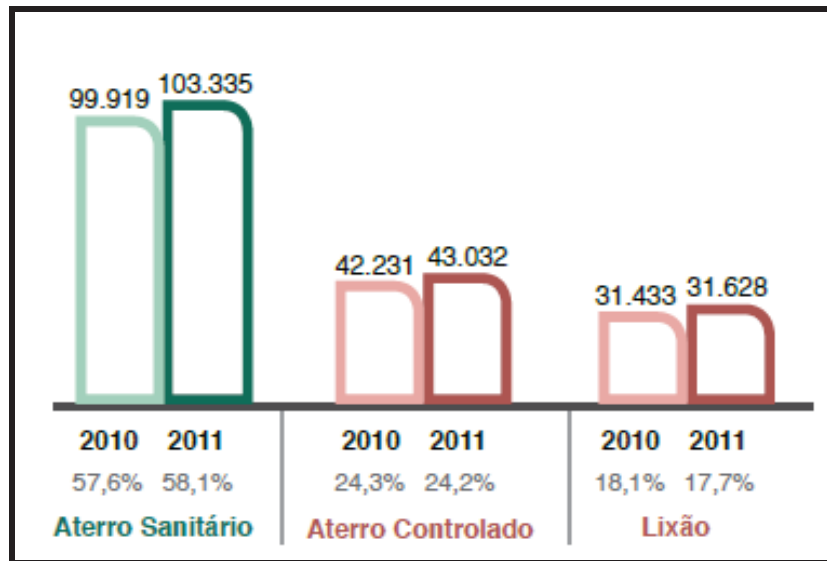


Figura 1. Destinação final de resíduos sólidos urbanos (t/dia)

Fonte: ABRELPE, 2011.

Analisando a Figura 1 acima, observa-se que há uma tendência de eliminação dos lixões. Isto pode se tornar realidade após a aprovação Lei 12305, de 2 de agosto de 2010, regulamentada pelo decreto 7404, a qual institui o fim dos lixões até o ano de 2014.

Segundo o IPT, 2000,

Lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Dessa maneira, os resíduos lançados acarretam problema como a proliferação de vetores de doenças e a geração de maus odores. Além disso, a ausência de impermeabilização do local onde os resíduos estão sendo depositados ocasiona na contaminação do solo e das águas superficiais e subterrâneas.

De acordo com a ABNT (NBR 8.419, 1992),

O aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos consiste na técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos ou riscos à saúde pública e à segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho ou a intervalos menores se for necessário.

O Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares de 2011 realizado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB (MCT, 2009) apresenta informações relativas aos locais

de destinação dos resíduos sólidos domiciliares em cada município do Estado de São Paulo. O inventário é subdividido em características locacionais, estruturais e operacionais. Os dados referentes a essas características permitem expressar as condições ambientais dos locais de disposição final de resíduos por meio de índices, como por exemplo, o IQR – Índice de Qualidade de Aterro de Resíduos, com variação de 0 a 10 e classificá-los em três faixas de enquadramento: 0 a 6,0 – inadequado, de 6,1 a 8,0 – controlado e de 8,1 a 10 – adequado. A Figura 2 apresenta o mapa do estado de São Paulo com o IQR nos anos de 1997 e 2011.

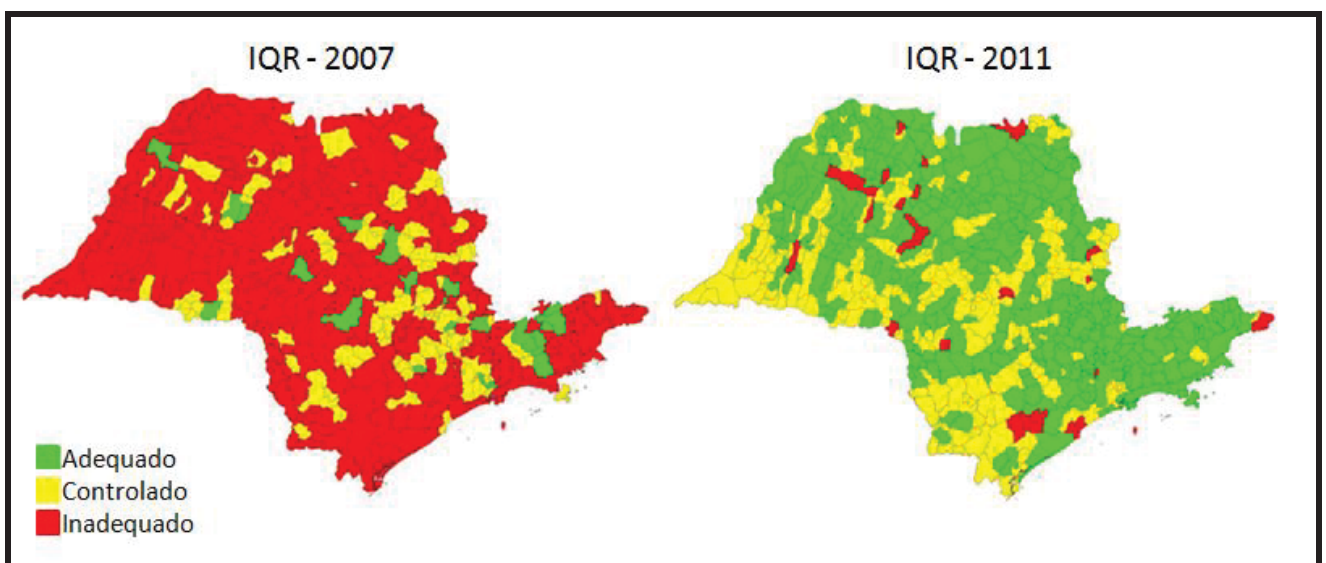


Figura 2. IQR do Estado de São Paulo em 1997 e em 2011.

Fonte: Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares – CESTESB (2011)

3.2 Degradação anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos

Em aterros sanitários, a matéria orgânica sofre decomposição inicialmente aeróbia, decorrente da presença de oxigênio nos resíduos aterrados, e posteriormente anaeróbica, na ausência do oxigênio, com a geração de gases e líquido percolado (lixiviado ou chorume).

O ecossistema anaeróbio de um aterro sanitário é resultado de interações complexas entre microrganismos de diferentes espécies. Essas interações ocorrem de forma que um grupo de bactérias utiliza um determinado tipo de substrato gerando produto para outro grupo de bactéria e assim sucessivamente. (VILAS BOAS, 1990)

A decomposição na matéria orgânica dos resíduos sólidos em um aterro sanitário é composta por cinco fases (Figura 3) descritas a seguir. (POHLAND and HARPER, 1986).

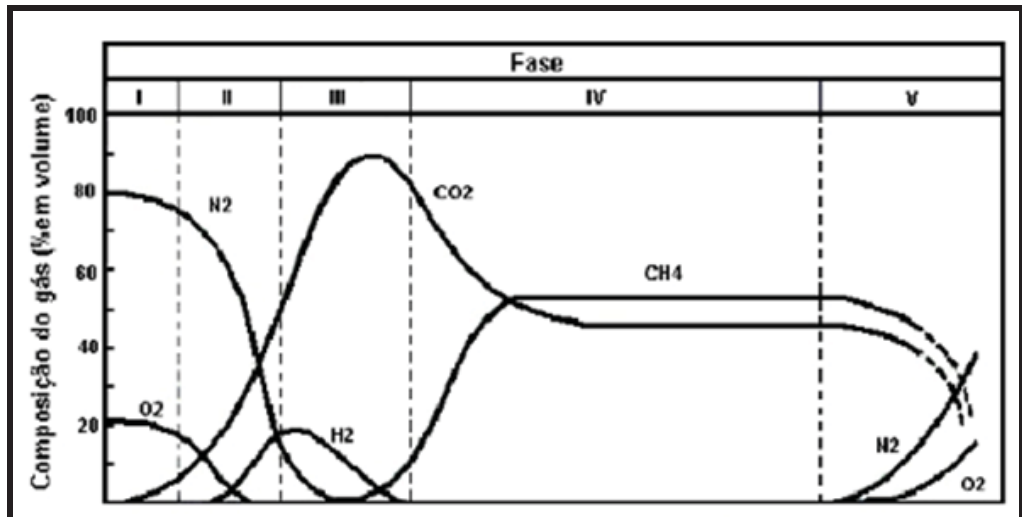


Figura 3. Fases da decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários.

Fonte: TCHOBANOGLOUS (1993)

Fase I – Ajuste Inicial: Esta é a fase de deposição do resíduos sólidos no aterro, onde ocorre as primeiras mudanças nos parâmetro ambientais. Nesta fase inicial ocorre o processo de degradação aeróbia, com a presença de oxigênio, da matéria orgânica.

Fase II – Transição: É a fase de transição da condição aeróbia para a anaeróbia, na qual o receptor primário de elétrons passa a ser nitratos e sulfatos ao invés do oxigênio. Nesta fase se inicia o aparecimento de produtos metabólicos intermediários, como ácidos orgânicos voláteis (AOV) no lixiviado.

Fase III – Acidificação: As reações de hidrólise e fermentação da fração orgânica dos resíduos torna predominante os ácidos orgânicos voláteis (AOV), causando queda no pH. Nesta fase ocorre a liberação e assimilação de nitrogênio e fósforo e é o início do aparecimento de hidrogênio.

Fase IV – Metanogênese: Nesta fase ocorre consumo contínuo de nutrientes, como nitrogênio e fósforo e o consumo de produtos intermediários para a formação de metano e dióxido de carbono, que juntos formam o biogás.

Fase V – Maturação Final: Nesta fase os nutrientes podem se tornar limitantes e ocorre uma diminuição na atividade biológica reduzindo, ou até mesmo cessando a produção de biogás.

Segundo Pelczar Jr. (1996), a digestão anaeróbia, realizada por microrganismos na fração orgânica dos resíduos sólidos possui quatro fases de degradação: 1) Hidrólise enzimática, onde ocorre a hidrólise de materiais complexos em moléculas menores; 2) Acidogênese, na qual os produtos da hidrólise são metabolizados e convertidos em compostos mais simples; 3) Acetogênese, na qual ocorre produção de hidrogênio, dióxido de carbono e acetato e; 4) Metanogênese, etapa final de degradação na qual bactérias metanogênicas utilizam os substratos - ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono, para conversão dos compostos orgânicos em metano e dióxido de carbono (biogás). As fases de degradação anaeróbia da matéria orgânica são apresentada na Figura 4 a seguir.

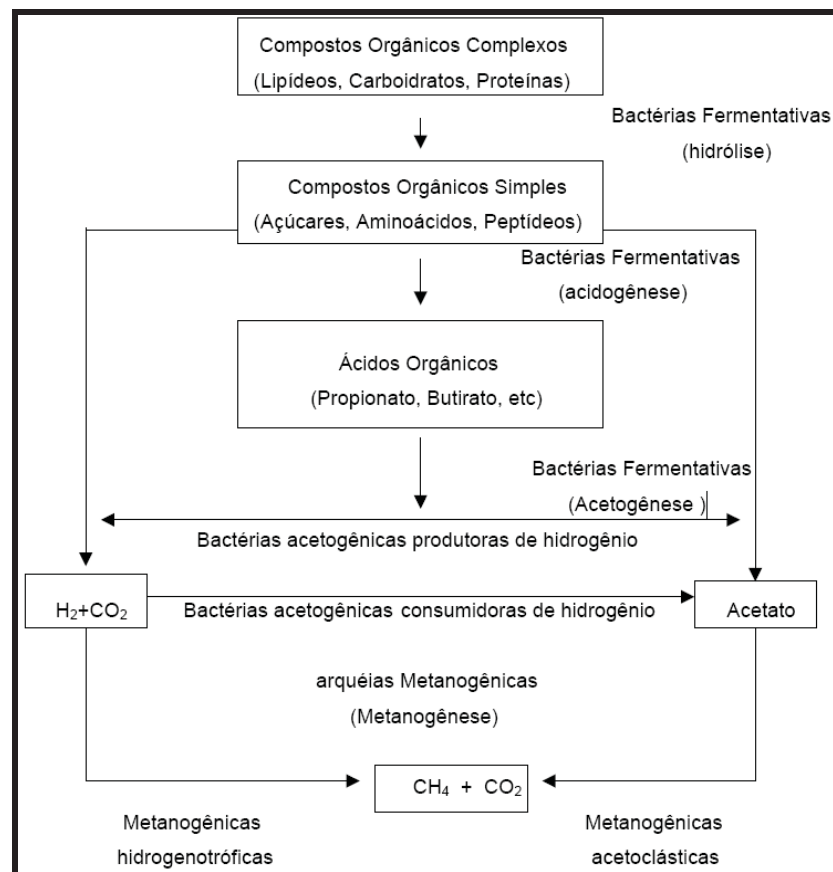
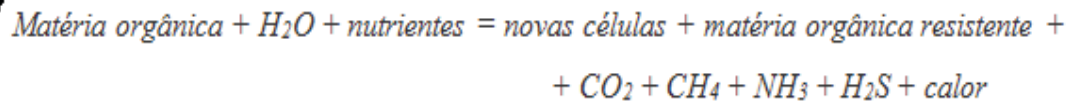


Figura 4. Sequencia metabólica da digestão anaeróbia.

Fonte: Pelczar Jr. (1996).

Segundo Tchobanoglous *et. al.*(1993), a Equação (1) representa a conversão biológica em condições anaeróbias da matéria orgânica dos resíduos sólidos urbanos para gases:



(Equação 1)

Como observado na Equação 1, os principais produtos finais do processo são dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4), amônia (NH_4), gás sulfídrico (H_2S), e matéria orgânica resistente. De acordo com Tchobanoglous *et. al.* (1993), na maioria dos processos de conversão, o dióxido de carbono e o metano constituem mais de 99% do total dos gases produzidos.

Segundo Pohland & Gould (1986) a degradação de matéria orgânica passa por cinco fases conforme apresentado na Figura 5.

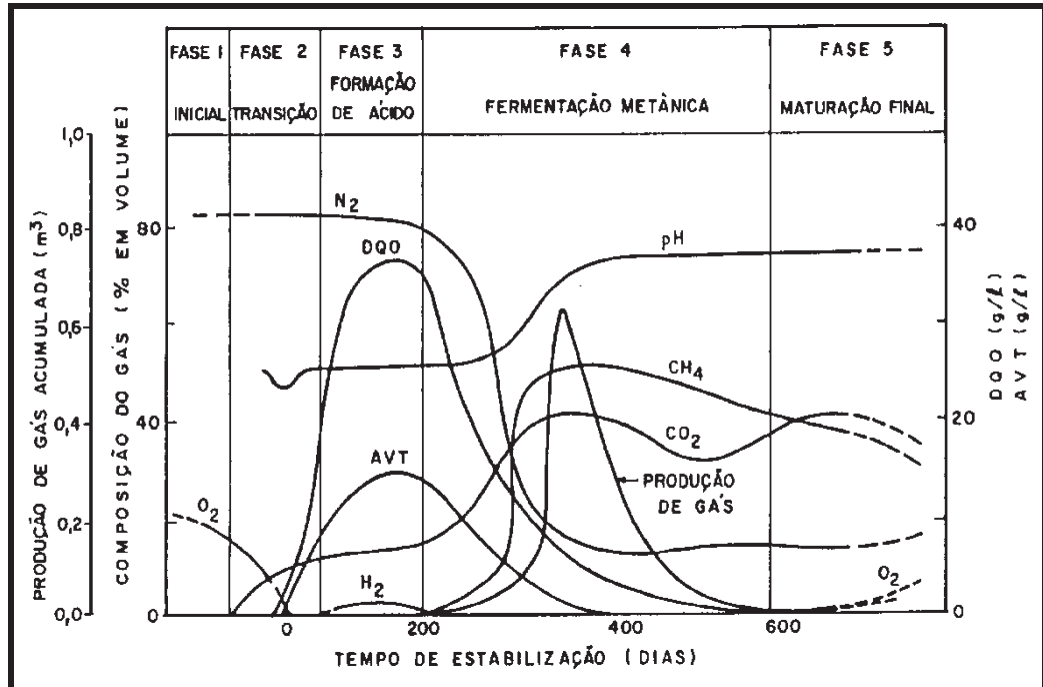


Figura 5. Fases da degradação da matéria orgânica presente nos resíduos sólidos de aterro sanitário.

Fonte: Pohland e Gould (1986).

Assim, na fase 1 inicia-se atividade microbiológica de um aterro sanitário, onde a umidade favorece as reações de degradação da matéria orgânica e o processo se dá por via aeróbia. A fase 2 é uma fase de transição, onde ocorre a passagem da condição aeróbia para a anaeróbia. Na fase 3 ocorre formação de ácidos, com predominância de formação de ácidos voláteis totais, com diminuição do valor do pH, elevação da demanda química de oxigênio (DQO) no lixiviado e aumento de espécies iônicas. Na fase 4 (fermentação metanogênica) ocorre a maior produção de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), o aumento do pH e a redução da formação de lixiviado. A fase 5 é a maturação final, onde os nutrientes estão escassos.

3.3 Fatores que influenciam na produção de biogás

Os gases gerados na decomposição da matéria orgânica em aterros sanitários dão origem ao biogás, gás incolor de baixa densidade. A Tabela 2 apresenta as principais características de alguns gases encontrados no biogás.

Tabela 2. Características dos gases presentes no biogás.

Gás	Fórmula	Conc. Típica	Densidade (Kg/m ³)	Potencial Calorif. (kJ/m ³)	Limite Explosivo	Solub. Água (g/L)	Propriedades Gerais
Metano	CH ₄	45-60%	0,717	35.600	5-15%	0,0645	inodor, incolor, asfixiante e inflamável
Dióxido de carbono	CO ₂	40-60%	1,977	----	----	1,688	inodor, incolor, asfixiante
Nitrogênio	N ₂	2-5%	1,250	----	----	0,019	inodor, incolor
Oxigênio	O ₂	0,1-1,0%	1,429	----	----	0,043	inodor, incolor
Sulfeto de Hidrogênio	H ₂ S	0-70ppm	1,539	12.640	4,3-45,5%	3,846	inolor, muito toxico
Hidrogênio	H ₂	0-0,2%	0,090	10.760	4-74%	0,001	inodor, incolor, não tóxico e inflamável
Monóxido de Carbono	CO	0-0,2%	1,250	----	12,5-74%	0,028	inodor, incolor, tóxico, inflamável

OBS.: Densidade. do ar atmosférico $\approx 1,29\text{kg/m}^3$

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous *et al.* (1993); Gandolla *et. al.* (1997) *apud* Maciel (2003).

De acordo com o United States Environmental Protection Agency (USEPA 1991 e 1996 apud MENDES, 2005, p. 31), os fatores que influenciam a taxa de geração do biogás são:

- Composição dos resíduos: quanto maior a porcentagem de material orgânico no resíduo, maior o potencial de geração de metano;
- Concentração de oxigênio: a matéria orgânica deve sofrer decomposição em ambiente sem oxigênio; dessa maneira, podem-se cobrir os resíduos com terra ou com o próprio resíduo, criando condições anaeróbias nas camadas inferiores do aterro;
- pH: as bactérias metanogênicas atingem maior produtividade com pH entre 6,8 e 7,2. Na fase inicial, os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica.
- Temperatura: A temperatura ideal para a digestão anaeróbia está entre 29 e 38°C para as bactérias mesofílicas e entre 49 e 70°C para as termofílicas. Abaixo de 10°C há uma queda brusca na taxa de geração do gás metano. Tipicamente, a própria decomposição fornece calor suficiente para que ocorra a metanogênese. A produção de biogás a partir da decomposição da matéria orgânica ocorre na digestão anaeróbia das bactérias mesofílicas e termofílicas, porém segundo McBean et al.(2005) as bactérias metanogênicas termófilas geralmente produzem maiores taxas de geração de biogás, no entanto, a maioria dos aterros sanitários se encontram na fase mesófila,
- Umidade: essencial à vida das bactérias decompositoras. Uma umidade alta, aproximadamente 60% em peso, aumenta a geração de biogás.

A água tem um papel muito importante, pois é fundamental no processo químico da fermentação anaeróbia e na produção do biogás e serve de meio de transporte para os produtos gerados pelo processo de decomposição; facilita a mistura entre alguns componentes solúveis e participa na transformação dos componentes orgânicos em metano e dióxido de carbono na fase anaeróbia (BRAZ, 2001).

Liang & Chen (2011) mostraram que em um estudo realizado no aterro sanitário de Taiwan as concentrações de metano variaram com o aumento da precipitação e com o aumento da temperatura ambiente. A Figura 6 a seguir apresenta o volume da concentração de metano, em porcentagem, em um dos drenos de gás medidos no estudo, o qual fica demonstrado que a maior concentração de metano foi no período de verão (mês de junho) no qual há um aumento da temperatura e da precipitação.

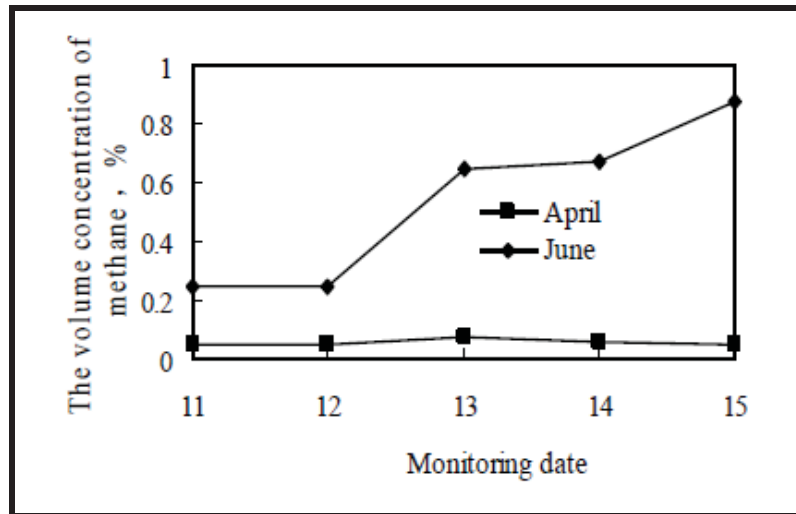


Figura 6. Concentração de metano nos meses de abril e junho em um dos drenos estudados.

Fonte: Liang & Chen (2011)

Estudos realizados por ALVES, (2008) com a finalidade de avaliar a capacidade de biodegradação dos resíduos por meio da produção total de biogás em biorreatores concluiu que a baixa umidade dificulta a degradação dos resíduos, enquanto valores elevados favorecem a degradação, conforme apresenta a Tabela 3.

Tabela 3. Valores da produção de biogás para as amostras de resíduo dos biorreatores com diferentes umidades.

Amostra	Produção de Biogás			
	Vol.máx. acumulado (NmL)	Tx. de Geração Máxima (NmL/dia)	NmL/gSV	NmL/gMS
Reator 1 (20% umidade)	499,1	54,6	2,0	2,2
Reator 2 (40% umidade)	5558,3	395,9	22,4	25,2
Reator 3 (60% umidade)	2192,8	204,9	8,8	9,9
Reator 4 (80% umidade)	7774,7	792,5	31,4	35,3

NmL/gSV = NmL Biogás/g Sólidos Voláteis; **NmL/gMS** = NmL Biogás/g Matéria Seca.

Fonte: Alves, 2008

No entanto, a umidade excessiva pode se tornar um fator negativo na degradação anaeróbia (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Estudo realizado em uma célula experimental do aterro sanitário de Belo Horizonte/MG indicou que o excesso de umidade e o elevado nível de líquidos no interior do aterro foram, possivelmente, os fatores que inibiram o processo de digestão anaeróbia no interior do aterro em vários momentos. Nesse estudo, foi verificada uma diminuição da produção de biogás quando o teor de oxigênio aumentou, e esses elevados teores de oxigênio foram ocasionados provavelmente pela infiltração de água da chuva e/ou ar atmosférico pelas trincas da cobertura do aterro (CATAPRETA & SIMÕES, 2009).

Para Alves, 2008, a construção de aterros sanitários com camada de cobertura com baixo coeficiente de permeabilidade, com o objetivo de diminuir a geração de líquidos percolados, reduz a umidade dos resíduos aterrados, o que pode prejudicar a formação do biogás. Dessa maneira, é importante ressaltar que a umidade é um dos principais fatores que influenciam na estabilização do resíduo em um aterro sanitário.

Segundo Brito Filho, 2005, outros fatores que podem influenciar a taxa de geração de gás são os nutrientes, bactérias, potencial oxidação-redução, densidade da produção gás, compactação dos resíduos, dimensões do aterro (área e profundidade), operação do aterro e processamento de resíduos variáveis.

Segundo CASTRO e BELLO (2010) as características climáticas e os resíduos com elevada porcentagem de material orgânico com alta biodegradabilidade, cria condições favoráveis a produção de metano, as quais dificultam a aplicação segura de modelos matemáticos para a estimativa do potencial de geração de gás metano.

No estudo realizado em uma célula experimental, com cerca de 36.000 t de resíduos urbanos, no Aterro da Muribeca/PE, observou que inicialmente o biogás estava com baixa concentração de CH₄, entretanto após o fechamento da célula as condições anaeróbias se estabeleceram, indicando que os resíduos encontravam-se na fase de degradação metanogênica, apresentando concentrações médias de CH₄ e CO₂ em torno de 55% e 40%, respectivamente. Com esse estudo foi verificado que a produção de biogás da célula estava muito superior ao previsto por modelagens tradicionais de degradação dos resíduos, o que indica que a decomposição dos resíduos para as condições climáticas e operacionais da Célula Experimental é muito mais rápida que o previsto na literatura técnica internacional. (MACIEL *et. al.*, 2009).

A umidade e a temperatura são os fatores ambientais mais importantes que determinam a velocidade da biodegradação dos resíduos, reduzindo-se a produção de metano com a diminuição da temperatura e da umidade. Assim, é importante ressaltar que o Brasil possui na maior parte de seu território condições de clima favoráveis para a produção de biogás em termos de umidade e temperatura (LEITE, 2005).

Além destes fatores citados acima, para Matos (2008) a recirculação do lixiviado é um fator que otimiza o processo de degradação dos resíduos e assim, acelera a produção do biogás.

3.4 A influência da recirculação do lixiviado na produção de biogás

A idéia de acelerar a decomposição dos resíduos por meio da recirculação de lixiviado em aterros sanitários anaeróbios foi proposto pela primeira vez por Pohland, em 1975, com o objetivo principal de aumentar a produção de gás metano para recuperação de energia.

Com o propósito de aumentar a vida útil de aterros de disposição de resíduos, diminuir os custos de tratamento do lixiviado e aumentar a produção de biogás é crescente a quantidade de aterros sanitários que estão praticando a recirculação do lixiviado com a ideia de acelerar o processo de degradação dos resíduos (BILGILI et. al., 2006).

Além de proporcionar o aumento da umidade no interior do aterro sanitário, a recirculação do lixiviado introduz, na massa de resíduos, bactérias responsáveis pela degradação anaeróbia. Segundo Matos (2008) as principais vantagens, apontados por diversos autores, do processo de recirculação de lixiviado são: utilização mais eficaz da capacidade útil do aterro; estabilização mais rápida dos resíduos; redução dos custos do tratamento de lixiviados; maior e mais rápida produção de metano e redução das emissões de compostos orgânicos voláteis.

De acordo com CASTRO (2001) a recirculação de lixiviado aumenta o teor de umidade tornando o meio mais favorável ao desenvolvimento de microrganismos, intensificando a atividade biológica, além de o aumento no teor de umidade contribuir para o transporte de nutrientes.

Chan *et. al* (2002) simulou aterros sanitários em dois biorreatores, um com recirculação de lixiviado e outro sem recirculação. Os resultados deste experimento mostraram que no reator com recirculação a produção de biogás foi maior do que o reator sem recirculação.

Segundo Pohland (1975) *apud* CASTRO (2001) a recirculação de lixiviado em aterros sanitários acelera a estabilidade da fração orgânica dos resíduos aterrados e a produção de gás criando maiores oportunidades para a utilização da energia proveniente do biogás.

Para Zeng, *et. al* (2006) atualmente é dada uma atenção maior para estudos de recirculação de lixiviado em aterros sanitários, pois esse processo é benéfico no sentido que acelera o processo de estabilização dos resíduos aterrados, aumenta a produção de biogás e melhora a qualidade do lixiviado, facilitando o seu tratamento. Quando ocorre o processo de recirculação de lixiviado o aterro de resíduos sólidos passa de um simples local de disposição de resíduos para um biorreator de tratamento de resíduos, onde toda a matéria orgânica é biodegradada.

Karthikeyan *et. al.* (2007) fizeram um estudo de tratamento anaeróbio dos resíduos em um lisímetro, funcionando como biorreator, onde foi recirculado o lixiviado para melhorar a degradação biológica. Esse estudo acompanhou a qualidade do lixiviado por um ano, avaliando parâmetros como DBO, DQO, STD, ST, SV, COD e COT. Os resultados desse estudo revelaram a diminuição substancial na matéria orgânica do lixiviado, no qual a DBO teve a redução de 99%, o COD de 88% e COT de 81%, além disso, verificou-se a redução de 5% da presença de nitrogênio. Dessa maneira, observam-se os benefícios da recirculação do lixiviado.

Matos (2008) utilizou o modelo desenvolvido pela United States Environmental Protection Agency (USEPA), conhecido como *Landfill Gas Emission Model* (LandGEM), para comparar as estimativas de produção de biogás em um aterro com e sem recirculação, utilizando valores médios dos parâmetros k e L_0 observados em aterros. O gráfico gerado é apresentado na Figura 7 abaixo. O volume total de biogás estimado foi de $7,4 \times 10^7 \text{ m}^3$ para o caso de recirculação de lixiviados, e de $5,5 \times 10^7 \text{ m}^3$ para a sua ausência sendo a produção de biogás esperada com recirculação foi de 1,4 vezes superior ao caso tradicional.

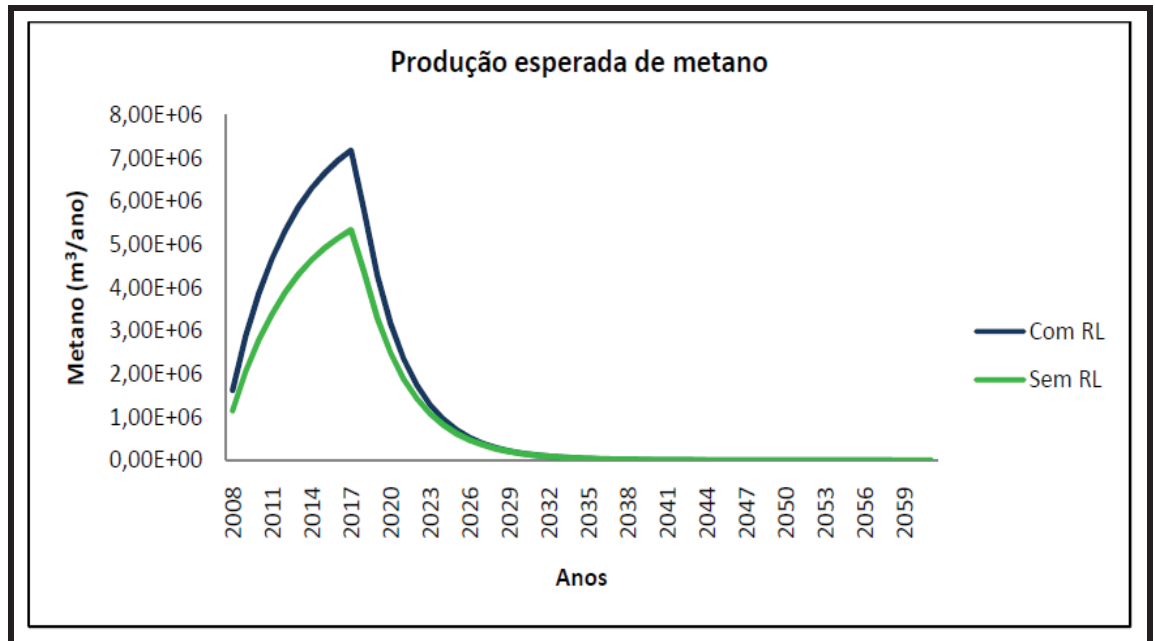


Figura 7. Produção estimada de metano com parâmetros médios observados.

Fonte: MATOS, 2008

3.5 Potencial Energético a partir do biogás de aterro sanitário

O aproveitamento energético do biogás, composto em aproximadamente 50% de metano possui um elevado poder calorífico, se consiste como uma potencial fonte de energia.

Para Cora (2008) a geração de energia a partir de biogás de aterro sanitário trás benefícios, entre eles: compensar o uso de combustíveis fósseis; melhorar a qualidade do ar local; reduzir o risco de explosão no local; redução dos riscos a saúde das pessoas que residem próximo a aterros sanitários e; dar valor econômico ao biogás.

Segundo Ensinas (2003), os primeiro projetos de aproveitamento de biogás foram implantados nos Estados Unidos, na década de 70, como medida de controle de emissões de metano e como fonte de energia em meio a crise do petróleo daquela época.

No ano de 1987, Bingemer & Crutzen fizeram uma análise da produção mundial de metano proveniente da decomposição anaeróbia em aterros sanitários e concluíram que a geração de metano iria aumentar progressivamente com o crescimento da população e com o desenvolvimento industrial dos países, e desta maneira os aterros sanitários poderiam ser a principal fonte de liberação de metano

para a atmosfera e sugeriram a utilização do biogás de aterro sanitário não só para geração de energia, como também para eliminar a emissão de CH₄ para a atmosfera.

Dias *et al* (2009) fizeram um estudo no aterro sanitário de Içara – SC, no qual foi feito um levantamento de campo da geração de biogás, para avaliar o potencial energético do aterro em questão. O resultado deste estudo estimou a produção de biogás entre 24,7Nm³/t.ano e 29,8 Nm³/t.ano.

Segundo Oliveira (1993) *apud* Pinotti (2009), 0,62m³ de biogás produz 1kWh de energia elétrica, desta maneira, o potencial energético do aterro sanitário de Içara – SC varia de 39,83kWh/t.ano a 48,06kWh/t.ano.

Projetos como o aproveitamento do gás de aterro para geração de energia ou simples queima do biogás no dreno geram receita com a venda de créditos de carbono no mercado internacional, o que incentiva o avanço da implementação de projetos de reaproveitamento do biogás e uma correta gestão dos resíduos sólidos domiciliares.

Em Ammam, maior cidade da Jordânia, os resíduos sólidos domiciliares (41,3% de matéria orgânica) são dispostos no aterro sanitário de Ghabawi, em 2009 iniciou-se a recuperação do biogás a fim de gerar de energia. Este projeto reduzirá aproximadamente 1,5 milhões de toneladas de CO₂ nos 7 primeiros anos, o que através de Mecanismos de Desenvolvimento Limpo são vendidos para Europa e geram receitas, as quais são, em parte, destinadas para atividades de proteção ambiental (MEDINA, 2011).

3.6 Características da área do aterro sanitário de Rio Claro – SP

O município de Rio Claro-SP, segundo o IBGE (2010), possui 186.253 habitantes e uma área de 499Km², esta localizado no centro-leste do estado de São Paulo, zona 23, longitude 235.477,83E e latitude 7.519.202,16N (Figura 8), onde se encontra os biomas de cerrado e mata atlântica. Pertence à Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos (UGRHI) 5 referente às bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá (PCJ).

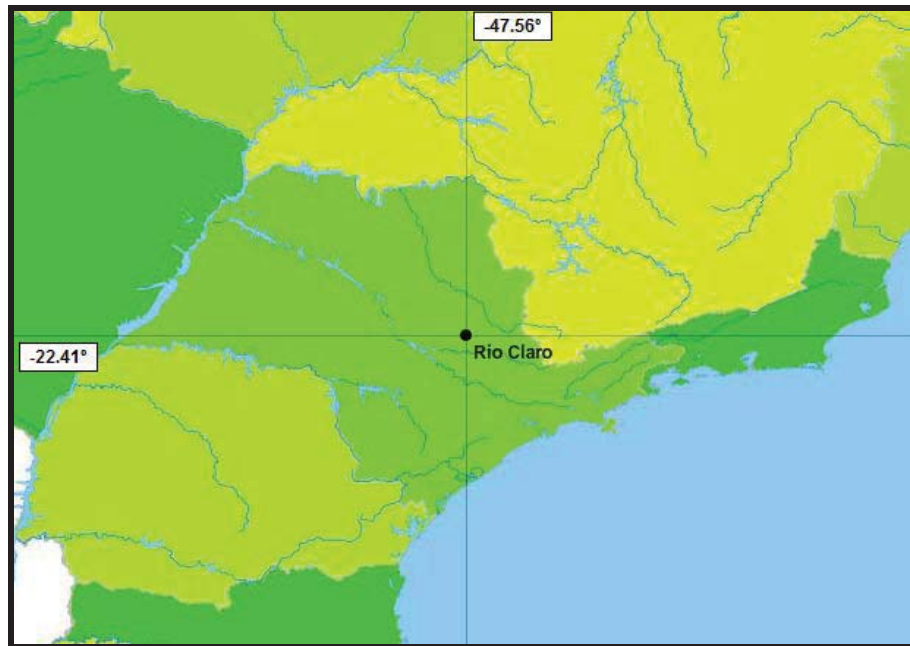


Figura 8: Localização do município de Rio Claro-SP

Fonte: IBGE (2010).

O município de Rio Claro possui média pluviométrica de 1.400mm/ano e um regime de chuva dividido em período de seca, entre abril e setembro, e um período chuvoso que dura de outubro a março, e corresponde a 80% das precipitações anuais (TROPMAIR, 1992).

O aterro sanitário de Rio Claro – esta localizado às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP – 127), aproximadamente a 8Km do centro urbano do município, como ilustrado na Figura 9. O aterro sanitário esta situado no alto topográfico divisor de águas entre o Ribeirão Claro e o Córrego da Servidão, ambos na bacia do Rio Corumbataí, e possui uma área de 141.637,68m² nível d'água da região do aterro varia entre 5,0m e 14,0m.

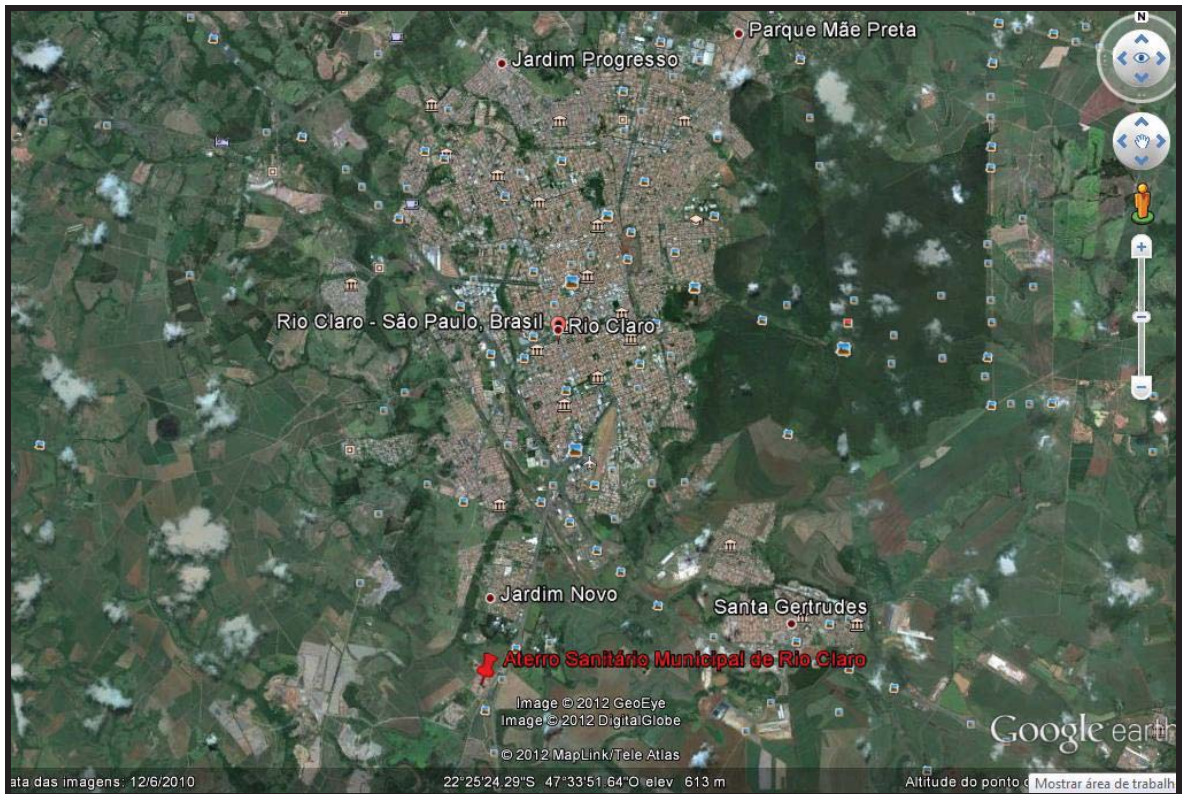


Figura 9. Imagem da localização do aterro sanitário de Rio Claro.

Fonte: Google Earth

Conforme apresentado no Relatório Ambiental Preliminar (RAP) do aterro sanitário de Rio Claro, a vida útil foi projetada para 16,2 anos, e a operação iniciou em 2001.

Segundo dados da Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente (SEPLADEMA) a média diária de disposição de resíduos no aterro em 2011 foi de 180,21 t/dia.

A CESTEB divulgou o Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares referente ao ano de 2011, os dados revelam a classificação do aterro sanitário de Rio Claro, que até 2010 era “adequada”, passou a ser considerada “controlada”, com redução da nota atribuída pelo Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR) para 7,4. O inventário também revela em relação às condições de tratamento e disposição dos resíduos domiciliares, que a melhor nota foi obtida em de 1997, com 9,6 e, a partir de 2009 a pontuação foi regredindo, em 2009 chegou a 8,0 em 2010 7,6 e agora em 2011, 7,4 (CORREIA, 2012).

O aterro possui quatro lagoas de estabilização, uma anaeróbia e seguida de lagoa aerada (dois aeradores), facultativa/sedimentação e de maturação. Porém, em função da baixa eficiência do sistema

de tratamento, e não atender aos padrões de lançamento para corpos d'água, o sistema opera em regime fechado, sendo o efluente enviado por caminhão pipa para tratamento em estação localizada no município de Jundiaí.

Como decorrência do sistema de tratamento operar em sistema fechado, ocorre diariamente a prática da recirculação do lixiviado na superfície do aterro sanitário, com auxílio de caminhão pipa, conforme apresenta as Figuras 10 e 11.



Figura 10. Coleta de lixiviado por caminhão-tanque para posterior recirculação na superfície do aterro.



Figura 11. Recirculação de lixiviado na superfície do aterro com auxílio de caminhão-tanque.

4. MATERIAL E MÉTODOS

Com a finalidade de apresentar as etapas e os procedimentos metodológicos utilizado na pesquisa esse capítulo foi dividido nos seguintes itens: Seleção dos drenos no aterro sanitário de Rio Claro – SP; Metodologia para análise da composição do biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP; Metodologia para a medição da vazão do biogás no aterro sanitário de Rio Claro – SP e; Forma de análise dos dados.

Desse modo pode-se resumir a metodologia na Figura 12.

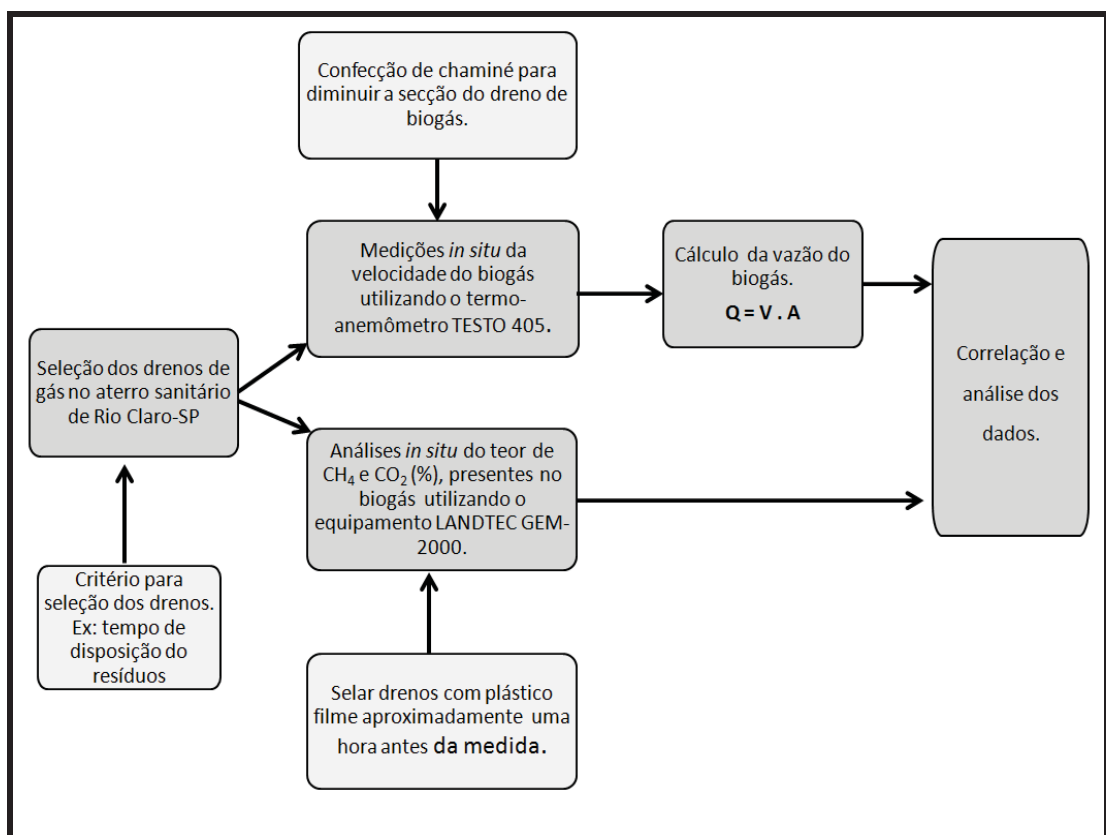


Figura 12. Fluxograma geral dos procedimentos metodológicos.

4.1 Seleção dos drenos no aterro sanitário de Rio Claro-SP

Inicialmente todos os drenos de gás foram identificados com auxílio de GPS. Com o programa GPS TrackMaker e uma imagem de satélite do Google Earth esses drenos foram georreferenciados, como mostrado na Figura 13 a seguir.

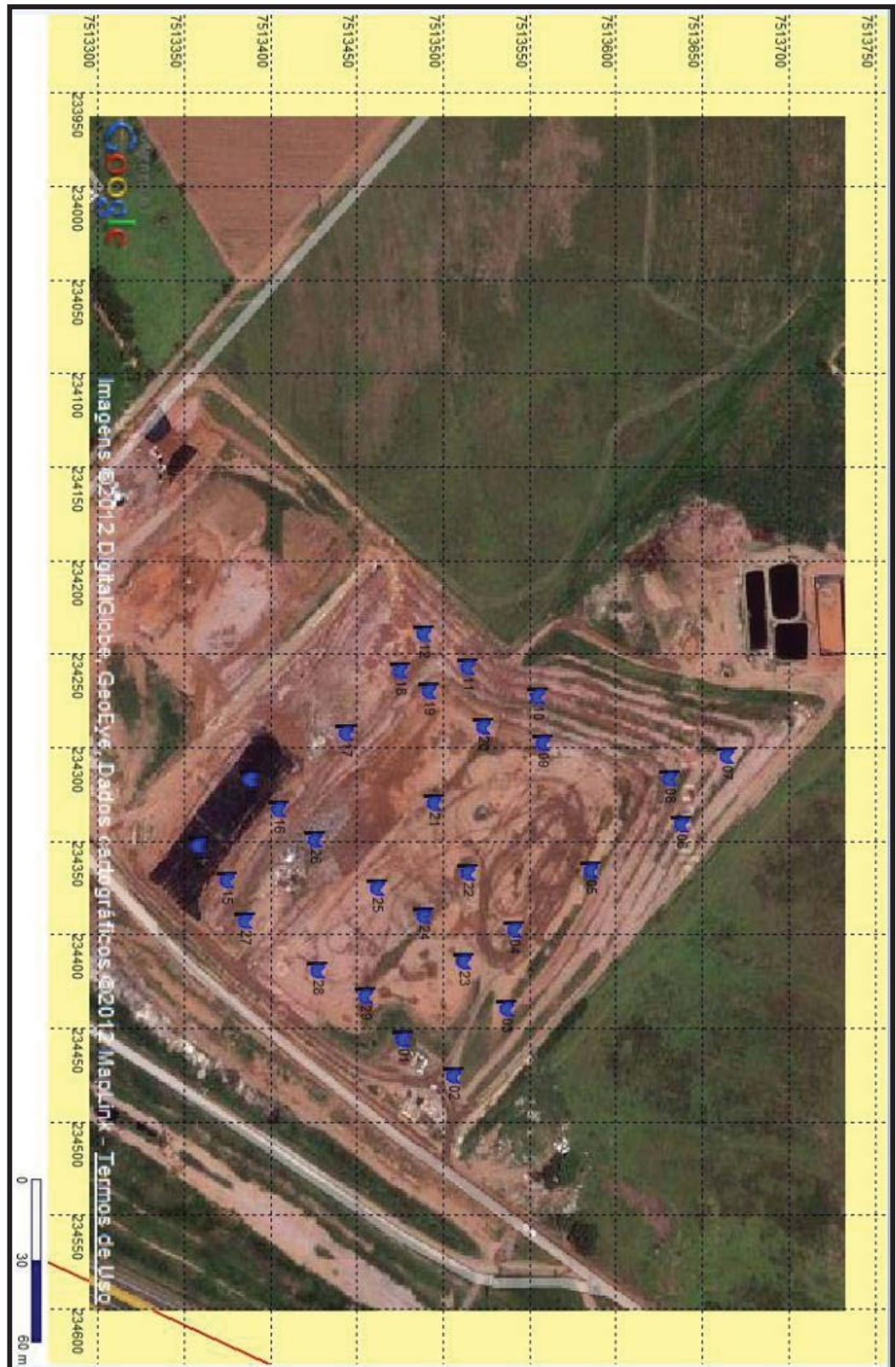


Figura 13. Imagem do aterro sanitário de Rio Claro – SP com a localização dos drenos de gás.

Após a identificação dos drenos foram realizadas quatro campanhas semanais onde foram tiradas medidas de velocidade, temperatura e concentração de CH_4 , CO_2 e O_2 do biogás. Os drenos localizados na área da frente de operação do aterro tinham estrutura tubular de plástico, com aberturas para a atmosfera (Figura 14), o que impossibilitou a medição do biogás devido a interferência dos gases atmosféricos na medição dos parâmetros analisados do biogás.



Figura 14. Imagem de um dos drenos de biogás na fase de construção, nos quais não foi possível medir o biogás.

Observou-se nas primeiras campanhas, que as concentrações do biogás em todos os drenos analisados apresentaram elevadas porcentagens de metano, as quais variaram de 47,8 a 56,2%, enquanto as CO_2 , foram de 37,5 a 46,7%. Dessa maneira, para selecionar os drenos para estudo considerou-se a vazão e a temperatura do biogás, pois estes parâmetros podem sinalizar para uma atividade biológica mais intensa.

Neste sentido, a metodologia para a definição dos pontos de amostragem dos gases no aterro teve por princípio abranger todos os possíveis fatores que podem influenciar na composição e na vazão dos gases, como por exemplo: áreas do aterro sanitário com idades distintas de operação; distribuição uniforme ao longo da área de disposição de resíduos; áreas com recirculação do lixiviado e a vazão e a temperatura dos gases.

Desta maneira, o aterro foi dividido em pequenas áreas que apresentam características semelhantes para o estudo dos gases (Figura 15). Para cada uma das áreas foi selecionado um conjunto de drenos para representá-las, conforme apresentado na Tabela 4 a seguir. Os drenos da frente de operação foram desconsiderados, pois se encontravam em fase de construção.

Tabela 4. Grupo de drenos a serem analisados.

Grupo	Drenos no grupo	Dreno analisado	Características da subárea
A	1 e 2	1	Resíduo mais antigo.
B	3, 4 e 5	5	Com intensa recirculação de lixiviado; Resíduo mais antigo.
C	6, 7 e 8	7	Sem recirculação de lixiviado; Resíduo mais antigo
D	9, 10, 11, 12, 18, 19 e 20	19	Sem recirculação de lixiviado; Resíduo mais antigo; área de menor nível topográfico; onde ocorreu a segunda fase de ocupação do aterro.
E	13, 14, 15, 16, 17 e 26	Sem amostragem	Sem recirculação de lixiviado; Resíduo novo. Drenos não finalizados no período do estudo.
F	27, 28 e 29	28	Com recirculação de lixiviado; Resíduo antigo e novo (aproximadamente um ano de disposição com o alteamento do último patamar).
G	21, 22, 23, 24 e 25	Sem amostragem	Com intensa recirculação; Resíduo com idade intermediária; Frente de operação durante o período do estudo

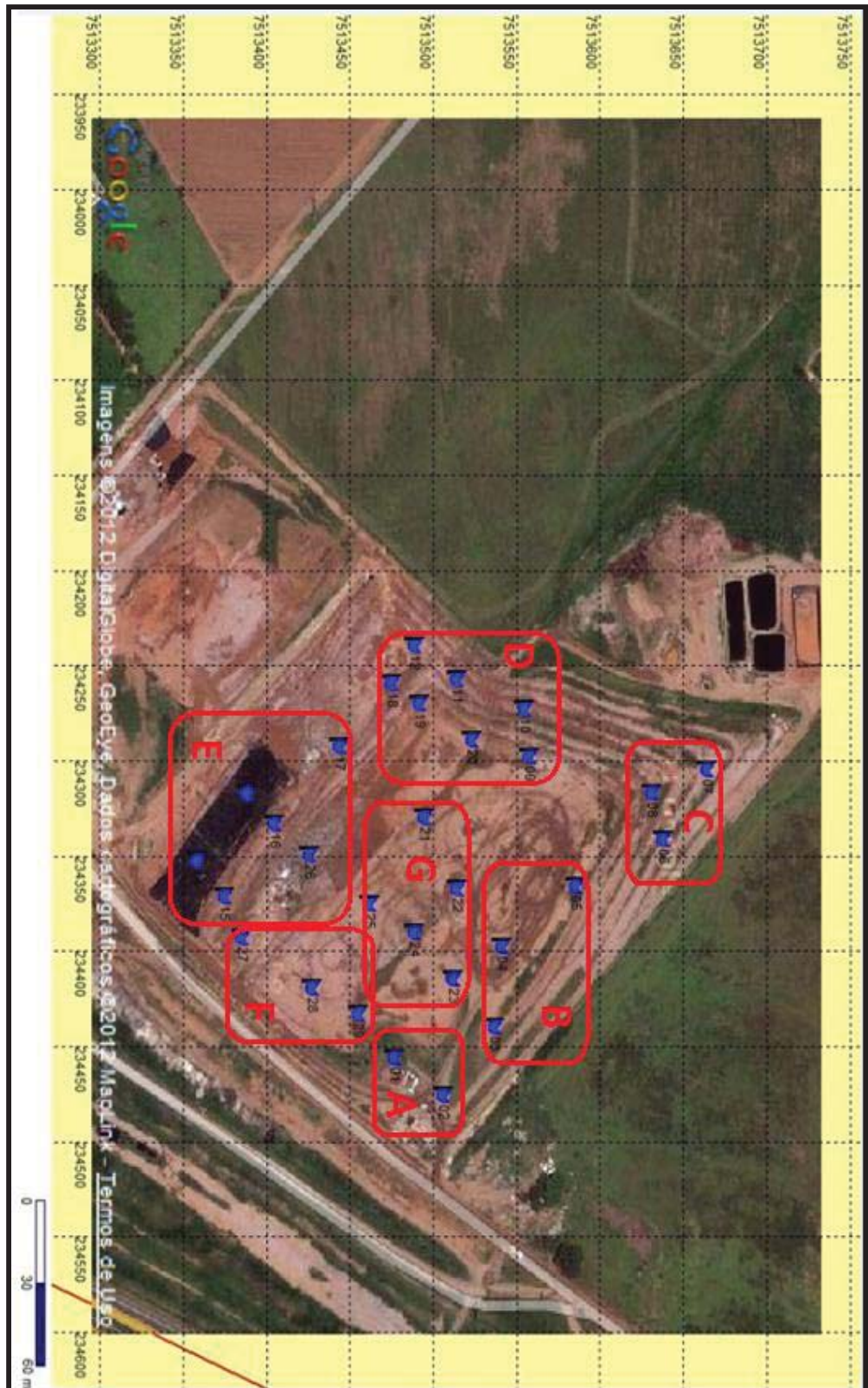


Figura 15. Subdivisão do aterro sanitário de Rio Claro-SP em subáreas de estudo

A classificação de resíduo “mais antigo” e “resíduo novo” foi baseada nas fases de ocupação do aterro sanitário de Rio Claro – SP. Assim, resíduos localizados na cota topográfica mais baixa e próximos as lagoas de lixiviado, foram dispostos no início da ocupação do aterro. No entanto, é difícil precisar exatamente o tempo de disposição dos resíduos.

A Figura 16 a seguir ilustra o avanço da ocupação do aterro sanitário de Rio Claro – SP.

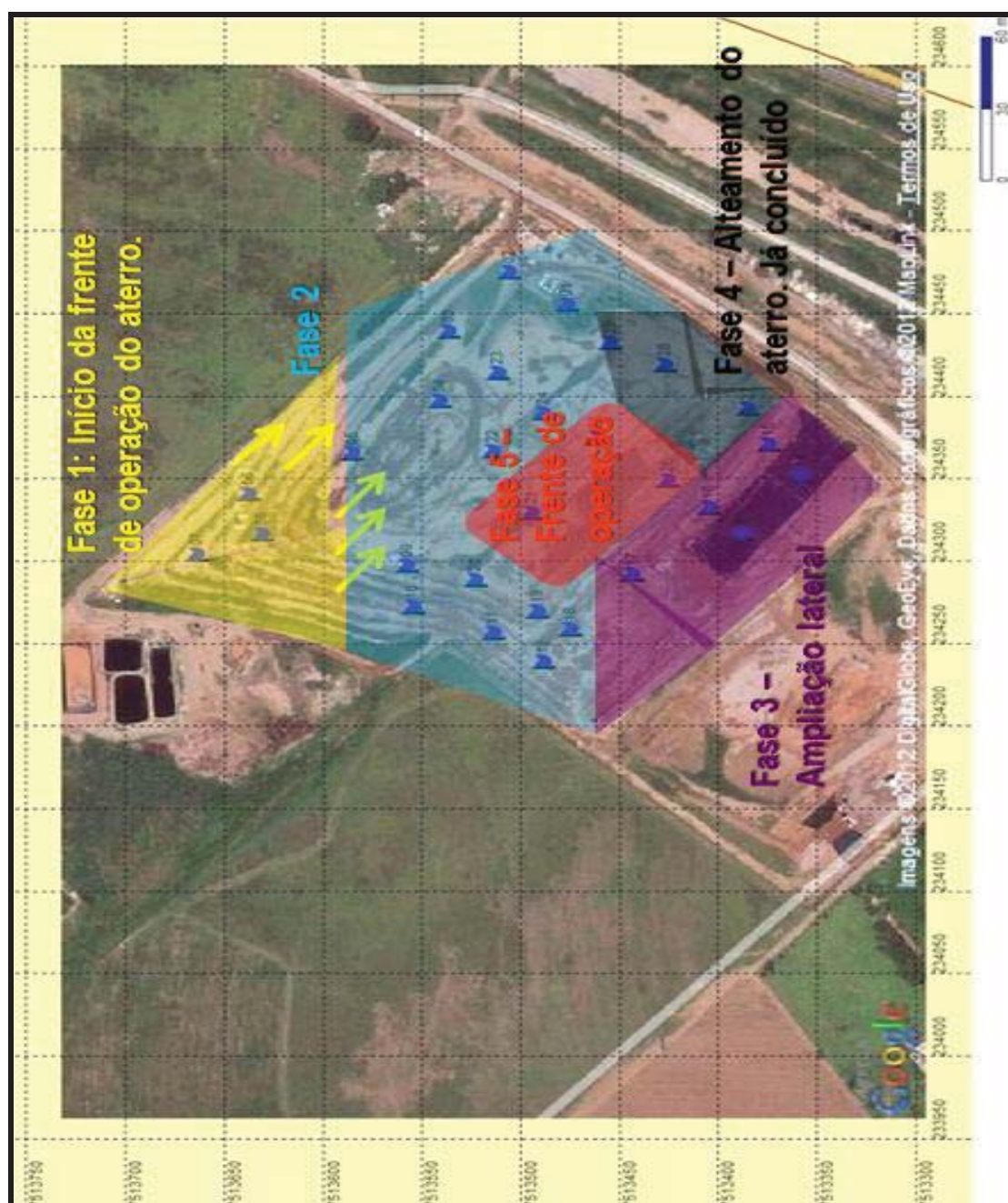


Figura 16. Avanço da ocupação do aterro sanitário de Rio Claro – SP e suas respectivas fases.

4.2 Análise da composição do biogás

A medição da composição do biogás foi realizada pelo Instrumento portátil LANDTEC GEM-2000 (Figura 17), o qual possui precisão de 3%. Esse aparelho fornece medidas de metano, gás carbônico, oxigênio e outros gases presentes no biogás, em porcentagem, pressão barométrica e relativa e, temperatura presentes no biogás analisado.



Figura 17. Instrumento para análise da concentração do biogás.

Previamente ao início das análises foi realizado um pré-teste, que consistiu na inserção da sonda do equipamento GEM-2000 diretamente no dreno aberto. Observou-se nas medidas uma grande interferência do ar atmosférico, principalmente nos momentos de maior intensidade do vento. Após orientações do fornecedor do equipamento, os drenos foram vedados, utilizando plástico filme.

Com a finalidade de analisar a interferência do tempo em que o dreno deveria permanecer vedado, realizou-se medições em duas situações distintas: drenos com 24 horas de vedação e drenos com apenas 1 hora de vedação. As duas situações apresentaram resultados semelhantes. Dessa maneira, foi padronizada a medição do biogás após 1 hora de o dreno ter sido vedado.

O procedimento utilizado para medir a concentração de gás metano presente no biogás nos drenos selecionados foi inicialmente apagar a chama (Figura 18A), resfriar o dreno com água (Figura 18 B), selar o dreno com plástico filme (Figura 18 C) e após uma hora medir as concentrações de CH_4 , CO_2 e O_2 e temperatura do biogás utilizando o equipamento LANDTEC GEM-2000 (Figura 18 D).

A medição da temperatura e concentração do biogás nos drenos foi realizada com a inserção das sondas de gás e de temperatura no plástico filme que vedava o dreno, conforme apresentado

na Figura 18 D. A inserção da sonda no dreno de gás foi padronizada em 10 cm, com o auxílio de uma marca na mangueira do equipamento LANDTEC GEM-2000.

Além disso, baseado no tempo em que o equipamento demandava para estabilizar as concentrações, foi padronizado em 1 minuto o tempo de sucção do equipamento para realizar a análise das concentrações de CH_4 , CO_2 e O_2 e a temperatura do biogás.



Figura 18. Procedimento de fechamento do dreno de gás para posterior medição.

4.3 Procedimentos para medição da velocidade do biogás e cálculo da vazão

Para a medição da velocidade do biogás nos drenos selecionados foi utilizado o termoanemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1, com precisão de 5% (Figura 19).



Figura 19. Termo-anemômetro.

Devido à baixa velocidade do biogás e a interferência do vento, foram construídos adaptadores de chapa galvanizada, semelhantes a “chaminés” (Figura 20) uma para cada diâmetro de dreno. A função do adaptador foi diminuir a área da secção do dreno para aumentar a velocidade do biogás e ao mesmo tempo diminuir a interferência do vento. O formato cônico das chaminés diminui a região de escoamento turbulento do fluxo de biogás.



Figura 20. Adaptadores para medição da velocidade do biogás.

O termo-anemômetro é inserido distante 14cm de redução da secção, e a uma distância 46cm do final do tubo, dessa maneira, o regime de transição de escoamento do biogás não influencia nas medidas de velocidade.

Para aferir a velocidade do biogás o termo-anemômetro é inserido 3cm perpendicularmente ao

fluxo de gás em um orifício com diâmetro exato do termo-anemômetro (Figura 21).

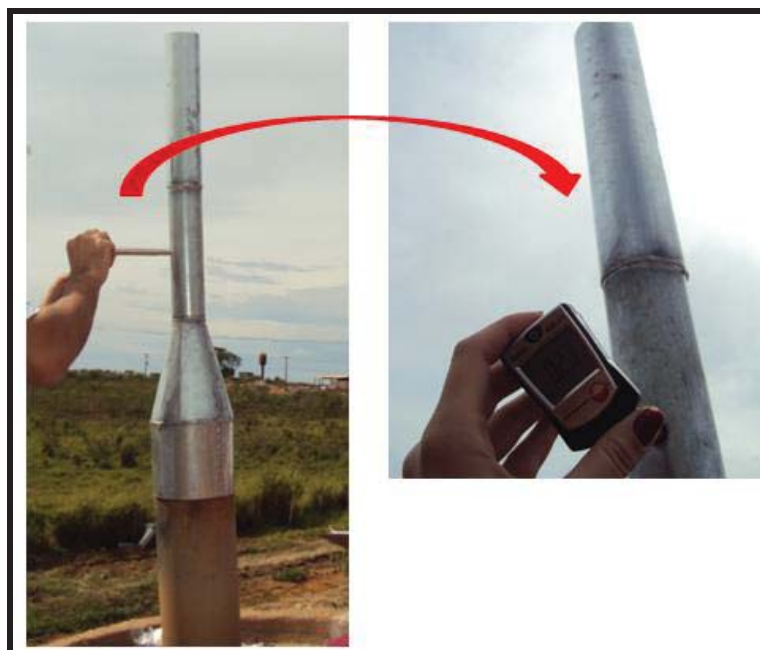


Figura 21. Termo-anemômetro inserido na chaminé para medição da velocidade do biogás.

Nas primeiras medidas verificou-se a ocorrência de interferência do vento nas medições. Dessa maneira, aumentou-se a estrutura da chaminé em mais 50 cm, e as medidas seguintes apresentaram bons resultados.

O termo-anemômetro é um equipamento muito sensível a alterações de velocidade, assim, as velocidades do biogás foram medidas a cada 10 segundos, durante 1 minuto, totalizando seis medidas, dessas seis medidas foi encontrada a velocidade média do biogás. Essa velocidade média foi utilizada para o cálculo de vazão.

Para o cálculo da vazão do biogás foi utilizada a Equação 2, apresentada a seguir.

$$Q = V \cdot A$$

Equação 2: Cálculo da vazão do biogás.

Onde:

V - é velocidade do biogás, em m/s;

A - área da secção da chaminé, em m²;

Q - vazão, em m³/s.

4.4 Forma de análise dos dados

Os resultados obtidos por meio das análises realizadas em campo foram analisados inicialmente comparando a vazão e composição do biogás dos grupos de drenos analisados (apresentados na Tabela 4) com as fases do processo de degradação anaeróbia apresentado na bibliografia.

Em seguida, realizou-se o cruzamento dos dados de porcentagem de metano presente no biogás dos drenos analisados com a idade de disposição dos resíduos de cada grupo de drenos, a fim de estudar a relação da porcentagem de metano no biogás com o tempo de disposição dos resíduos.

Da mesma maneira, os dados da porcentagem de metano e vazão de biogás foram cruzados com dados de precipitação mensal.

Os dados pluviométricos utilizados neste estudo foram fornecidos pelo Centro de Análise e Planejamento Ambiental – CEAPLA, localizado na Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, no campus de Rio Claro – SP.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados das análises de concentração de metano presente no biogás do aterro sanitário de Rio Claro – SP são apresentadas na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5. Resultado das análises de concentração de gás metano (em porcentagem) presente no biogás dos drenos estudados.

Data		Dreno 01	Dreno 05	Dreno 07	Dreno 19	Dreno 28
03/mai	CH ₄ (%)	57,8	55,9	52,5	54,5	53,1
17/mai		56,3	56,7	53,6	54,2	54,8
31/mai		55,8	54,7	49,2	54,9	49
14/jun		55,1	55	54,1	53,1	53,4
28/jun		54,4	56,3	53,4	54	51
12/jul		55,3	55	49,1	54,9	54,1
26/jul		56,4	55,4	52,6	53,7	54,8
09/ago		54	54,1	49,9	52,2	51,7
22/ago		53,6	51,3	51,8	54,2	46,1
05/set		53,3	54,3	33,7	52,6	49,9
19/set		51,6	48,5	41,1	50,7	39,2
03/out		54,1	52,2	42,2	52,5	49,1
17/out		53,1	53,4	40,1	52,2	52,3
Média		54,4	54,7	49,9	53,7	51,7
Desvio Padrão		1,6	2,2	6,5	1,2	4,2

Os resultados encontrados mostram que toda a massa de resíduos aterrada encontra-se na fase metanogênica de degradação anaeróbica, pois os valores médios de concentração de metano no biogás variam de 49,9% a 54,7%. Esses valores de concentração de metano no biogás podem ser explicados pelo fato de no aterro sanitário de Rio Claro- SP em toda a massa de resíduos aterrada, até mesmo as mais antigas, ainda existe matéria orgânica passível de degradação e é possível que a prática de recirculação do lixiviado favoreça a degradação dessa matéria orgânica.

Além disso, outro fator que pode estar relacionado com a elevada porcentagem de CH_4 na concentração do biogás é o fato de na composição gravimétrica do resíduo sólido domiciliar brasileiro a matéria orgânica ser predominante.

Os valores médios de concentração de metano no biogás, variando de 49,9% a 54,7%, estão de acordo com a bibliografia, pois como apresentado por Pohland and Gould (1986), na Figura 4, na fase de fermentação metanogênica a porcentagem de metano presente no biogás varia de 20% a 55%.

Outro fator estudado é a variação da porcentagem de metano no biogás de resíduos com diferentes idades de disposição. A Figura 22 ilustra os valores de concentração de metano no biogás do aterro sanitário de Rio Claro – SP com o objetivo de facilitar a comparação entre a concentração de metano no biogás e o tempo de disposição dos resíduos aterrados.

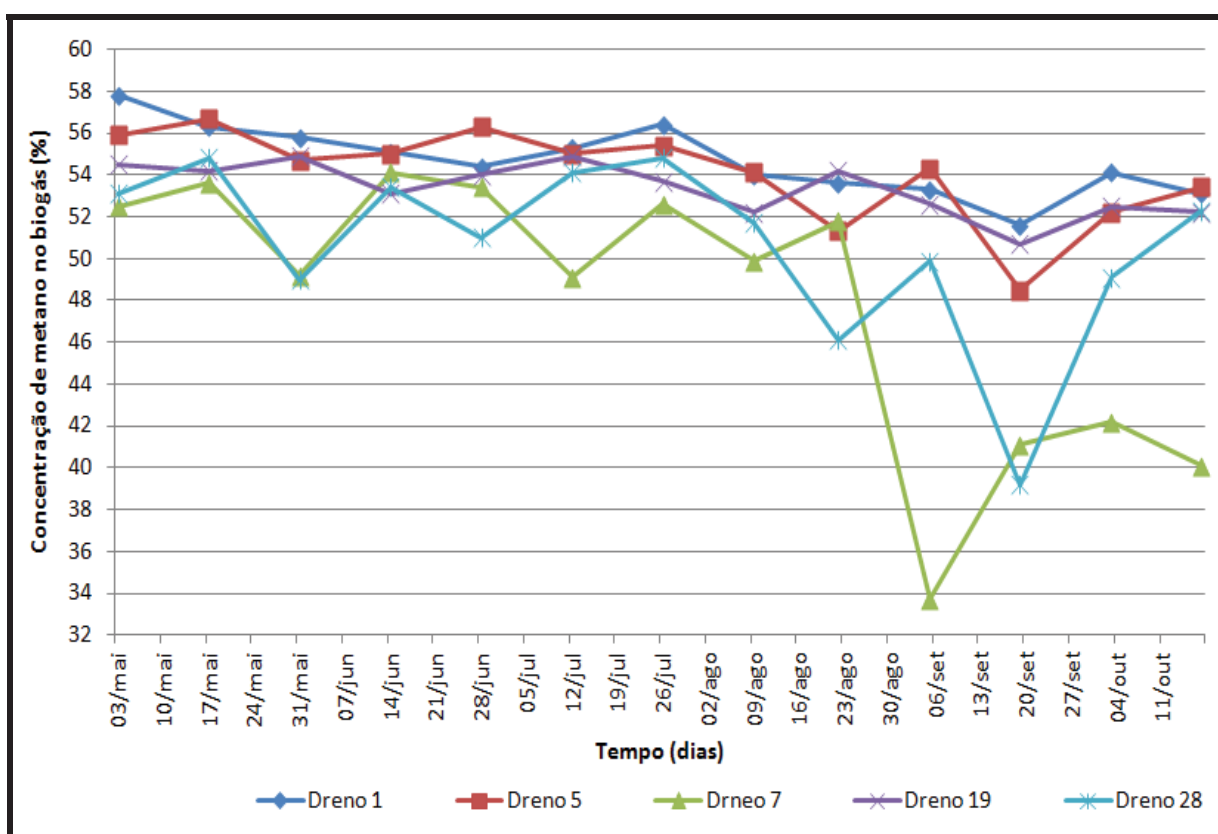


Figura 22. Valores de concentração de metano (em porcentagem) no biogás dos drenos analisados.

Analisando a Figura 22 podemos observar que os valores de concentração de metano no biogás quando comparado drenos localizados em áreas com idades diferentes de

disposição dos resíduos tem uma variação muito pequena, para o caso estudado no aterro sanitário de Rio Claro – SP. Por exemplo, o Dreno 7, o qual representa resíduos mais antigos apresenta média de concentração de metano de 49,9% enquanto o Dreno 19, o qual representa uma área com disposição de resíduos mais recente, apresenta média de 53,7% de metano no biogás

Esses valores diferem da bibliografia, na qual os resíduos mais antigos deveriam estar na fase de maturação final da degradação anaeróbia.

O fato de o tempo de disposição dos resíduos não interferir significativamente na concentração de metano presente no biogás pode estar associada também ao fato de recirculação do lixiviado, pois esta prática, além de aumentar a umidade dos resíduos, fator positivo na degradação anaeróbia, inocula bactérias decompositoras na massa de resíduos e dessa maneira, contribui para a degradação de material orgânico mais estável (mais difícil degradação) dos resíduos mais antigos.

A queda da concentração de metano apresentada no Dreno 7 para a análise do dia 05 de setembro de 2012 pode estar associadas à problemas durante a análise do biogás em campo, como por exemplo interferência do ar atmosférico e a alta velocidade do vento.

Os valores de desvio padrão da porcentagem de metano presente no biogás podem ser devido às mudanças climáticas, principalmente variação na precipitação. Dessa maneira, outro fator estudado foi a umidade.

Para estudar a interferência da umidade na concentração de metano presente no biogás foi feita a análise da variação da concentração de metano no biogás com a variação da precipitação durante o período estudado, apresentado na Figura 23.

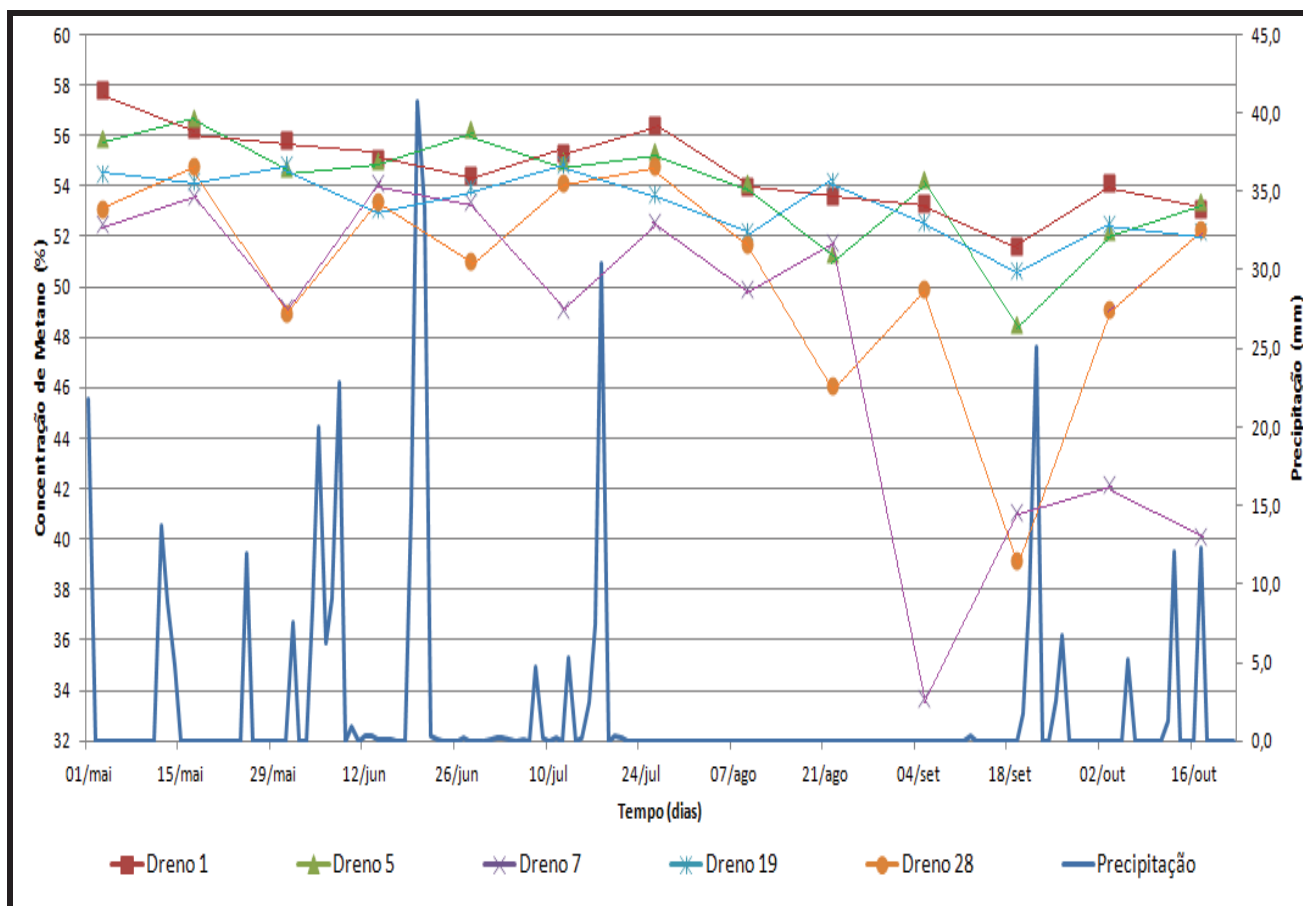


Figura 23. Variação da concentração do metano presente no biogás dos drenos estudados com a variação da precipitação no período estudado.

Analisando a Figura 23 observa-se que, de modo geral, a concentração de metano no biogás sofre pouca interferência da variação da precipitação, no entanto no período de 24 de julho até 19 de setembro de 2012, no qual não houve precipitação, ocorreu uma pequena redução nos valores da concentração de metano em todos os drenos.

Em contrapartida, quando começou o período de chuvas, a partir do dia 20 de setembro de 2012 houve um pequeno aumento na concentração de metano no biogás, que retornou a ficar na faixa de 48% à 56%, com exceção do Dreno 7, o qual mesmo voltando a subir, a concentração se manteve a mais baixa, isso é devido ao Dreno 7 ser o dreno que representa a área mais antiga do aterro.

Para o estudo da vazão de biogás nos drenos do aterro sanitário de Rio Claro – SP, os resultados são apresentados na Tabela 6 a seguir. A análise de campo do dia 19 de setembro de 2012 foi descartada, pois naquele dia o vento estava intenso, fator que interferiu na análise da velocidade do biogás nos drenos tornando os valores superestimados.

Tabela 6. Resultado das análises de vazão de biogás (em m³/h) presentes nos drenos estudados.

Data		Dreno 01	Dreno 05	Dreno 07	Dreno 19	Dreno 28	
03/mai	Vazão (m ³ /h)	33,32	50,19	30,57	109,10	129,18	
17/mai		43,44	42,02	38,57	122,40	117,26	
31/mai		36,29	41,69	27,34	85,36	94,95	
14/jun		39,31	36,89	23,84	93,52	102,68	
28/jun		39,31	45,68	25,43	90,02	98,02	
12/jul		37,93	36,42	31,73	114,40	110,37	
26/jul		46,09	36,13	31,31	152,86	121,12	
09/ago		27,44	31,34	20,50	96,96	98,98	
22/ago		22,20	35,85	15,47	113,07	67,82	
05/set		19,23	39,93	18,91	109,68	68,98	
03/out		26,06	56,46	29,72	134,53	86,47	
17/out		23,63	47,20	18,38	100,94	75,50	
Média			34,81	40,81	26,38	109,39	98,50
Desvio Padrão			8,50	6,84	6,51	18,60	19,26

Os valores da média de vazão apresentados na Tabela 6 mostram que os drenos 1 e 7, localizados em áreas do aterro mais antigas, apresentam menor valor médio de vazão enquanto os drenos 19 e 28, localizados em áreas do aterro onde a disposição dos resíduos foi mais recente, apresentam maiores valores médios de vazão de biogás.

Os valores de vazão ilustrados na Figura 24 evidenciam que as áreas do aterro onde ocorreu o início da disposição dos resíduos (região do Dreno 7) possuem valores de vazão de biogás menores do que as áreas de disposição de resíduos mais recentes (área dos Drenos 19 e 28). Esses resultados são condizentes aos encontrados nas bibliografias, uma vez que a produção de biogás diminui com o tempo de disposição dos resíduos.

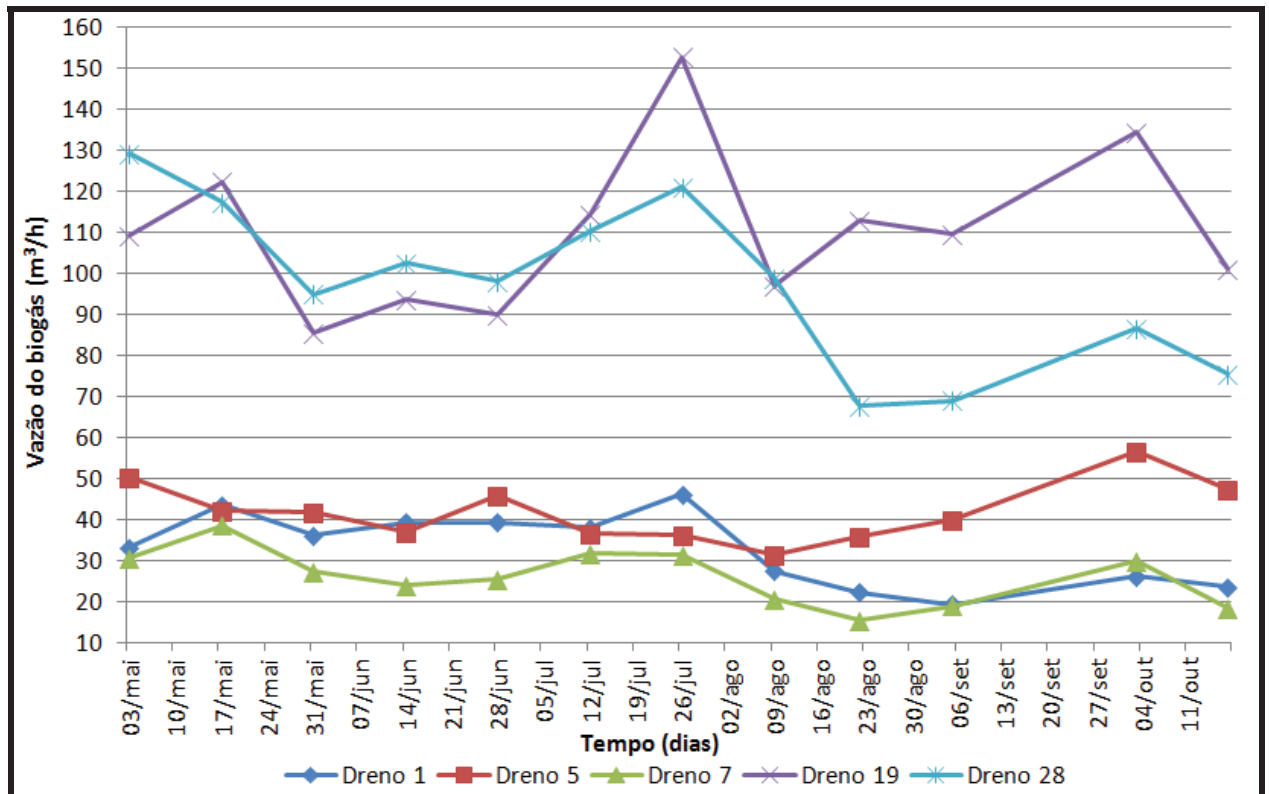


Figura 24. Valores de vazão do biogás (m^3/h) nos drenos analisados.

Os dados de vazão evidenciam que as áreas do aterro onde se tem resíduos mais antigos, a quantidade de matéria orgânica passível à degradação é menor do que nas áreas mais recentes de disposição de resíduos no aterro onde a quantidade de matéria orgânica ainda suscetível à degradação anaeróbia ainda é grande e provavelmente a atividade biológica é mais intensa.

A atividade de recirculação do lixiviado no aterro sanitário de Rio Claro – SP possivelmente contribui para a geração de biogás, pois inocula bactérias decompositoras e aumenta a umidade na massa dos resíduos, fatores que intensificam a atividade biológica de degradação da matéria orgânica e, desta maneira aumenta a produção de biogás.

Além da idade dos resíduos, outro parâmetro que influencia na produção de biogás é a umidade, que pode ser representada pela precipitação. A Figura 25 apresenta a variação dos valores de vazão encontrados nos drenos de gás analisados e a variação da precipitação durante o período estudado.

No aterro sanitário estudado a atividade de recirculação não será utilizada como parâmetro de umidade, para este estudo utilizou-se apenas a precipitação como fator de umidade, pois quanto maior a precipitação, maior será a quantidade de lixiviado recirculado, portanto, quanto mais precipitação mais umidade na massa de resíduos. Além disso, no

período de seca, observou-se em campo que a recirculação foi praticamente nula, tornando nulo o aumento de umidade na massa de resíduos.

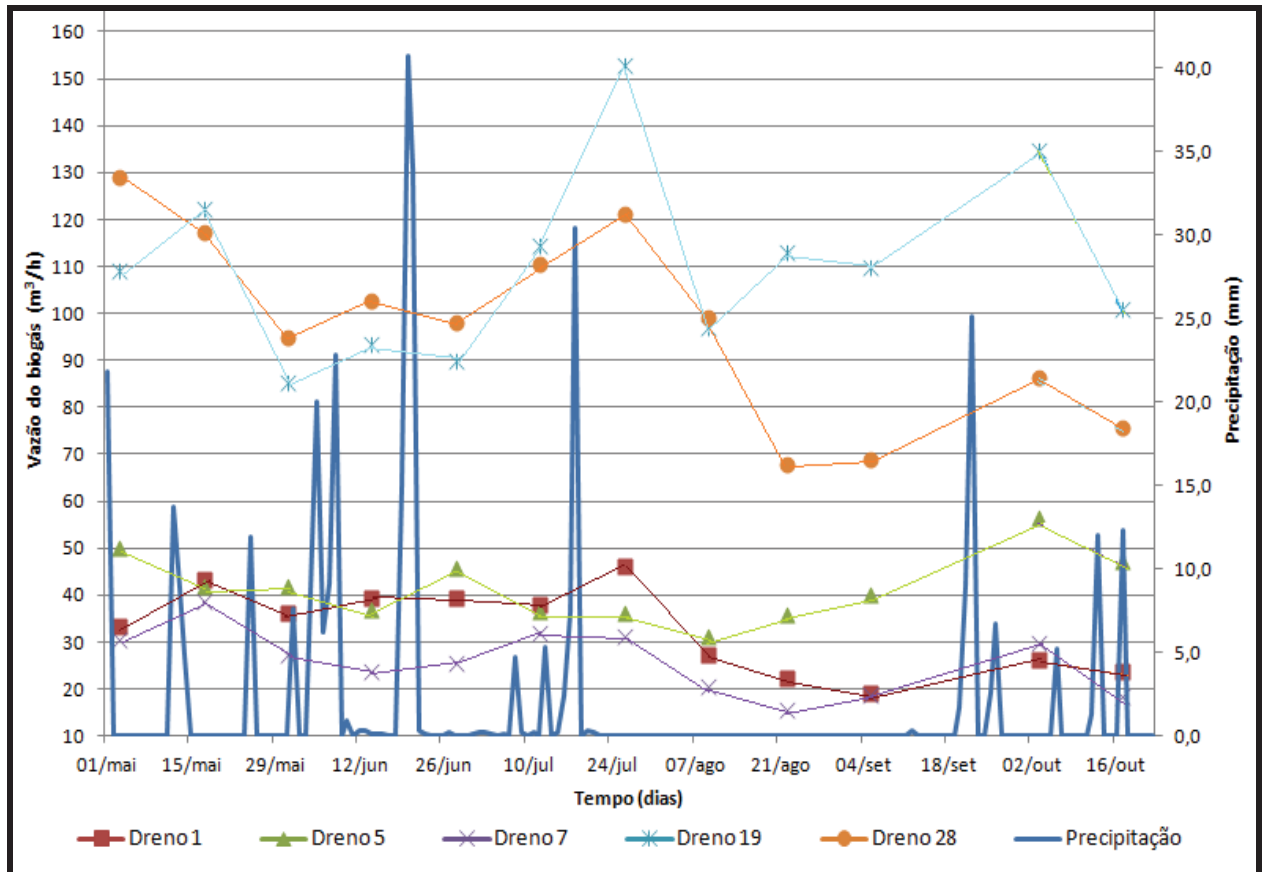


Figura 25. Variação da vazão de biogás (m^3/h) com a variação da precipitação no período estudado

Analisando a Figura 25, observa-se que no período sem chuva, de 24 de julho à 20 de setembro de 2012, a produção de biogás diminuiu, pois a massa de resíduos apresenta baixa umidade, o que reduz a atividade biológica, dificultando a degradação anaeróbia da matéria orgânica. No entanto, após a ocorrência da precipitação a umidade na massa de resíduos aumenta e conseqüentemente aumenta a geração de biogás. Como evidenciado pela análise do dia 05 de outubro, o qual mostra que após um grande período sem chuva, onde a vazão de biogás nos drenos estava baixa, depois da primeira precipitação, no dia 20 de setembro de 2012, os valores de vazão de biogás em todos os drenos voltaram a subir.

Por outro lado, quando há excesso de chuva a vazão diminuiu, como observado na análise dos dias 14 de junho e 9 de agosto, nas quais a vazão de biogás nos drenos diminuiu após ter ocorrido vários dias de chuva. Isso pode ser explicado pelo fato que quando há

grande quantidade de chuva a grande quantidade de água infiltrada pode ocasionar o aumento de oxigênio na massa de resíduos, inibindo o processo de degradação anaeróbia.

Além disso, os dados de vazão de biogás evidenciam que áreas com resíduos mais antigos, representados pelos drenos 7 e 1, a degradação anaeróbia da matéria orgânica sofre pouca influencia da precipitação.

6. CONCLUSÕES

As análises de campo mostraram que para todos os drenos de biogás analisados a composição média de metano presente do biogás varia de 49,9% a 54,7% indicando que o aterro sanitário de Rio Claro possui biogás de boa qualidade para utilização como fonte de energia.

Além disso, essa faixa de porcentagem de metano presente no biogás em todos os drenos amostrados evidencia que todo o aterro sanitário de Rio Claro se apresenta na fase metanogênica estável de degradação anaeróbica.

O máximo valor, em porcentagem, de metano encontrado no biogás foi 57,8% enquanto o valor mínimo foi de 33,7% mostrando pouca variação na composição do biogás em todo o aterro sanitário.

A porcentagem de gás metano no biogás teve pouca variação com a precipitação. Notou-se apenas que durante um grande período de seca houve queda sutil na porcentagem de metano.

A prática de recirculação do lixiviado na célula do aterro estudada é um fator que possivelmente contribui para manter a massa de resíduos na fase metanogênica de degradação anaeróbia, independente da idade dos resíduos.

Em contrapartida, verificou-se que o tempo de disposição dos resíduos é um fator que afeta a geração de biogás, pois drenos presentes em áreas do aterro onde foi o início da disposição dos resíduos apresentam valores de vazão menores que os valores encontrados em drenos de gás onde a disposição dos resíduos ocorreu em períodos mais recentes.

O valor máximo de vazão de biogás medido nos drenos foi 152,86m³/h, no dreno 19, e o mínimo valor foi de 15,47m³/h, encontrado no dreno 7 (mais antigo).

Da mesma maneira, outro fator que influencia na geração de gás metano é a precipitação (umidade). Verificou-se que no período de estiagem, no qual não houve precipitação, a vazão de biogás diminuiu em todos os drenos analisados e quando voltou a ocorrer precipitação houve um aumento na vazão de biogás nestes drenos.

Por outro lado, os estudos mostraram que, assim como encontrado nas bibliografias, após ocorrer um volume significativo de chuva a produção de biogás diminuiu devido ao aumento de oxigênio na massa de resíduos, pela infiltração da água da chuva, o que prejudica a degradação anaeróbica na matéria orgânica.

7. RECOMENDAÇÕES

Recomenda-se que para estudos futuros seja possível estudar o comportamento dos gases gerados no processo de decomposição da matéria orgânica dos resíduos sólidos desde o início da disposição dos mesmos até o decaimento da geração de gás, para que assim se consiga estudar o real comportamento do biogás e correlacionar com as etapas de degradação da matéria orgânica.

Da mesma maneira, recomenda-se o estudo aprofundado dos efeitos da recirculação do lixiviado na geração e composição do gás de aterro sanitário e, a interferência da recirculação do lixiviado na degradação anaeróbia do material orgânico de difícil degradação dos resíduos com maior tempo de disposição.

Além disso, aconselha-se a fazer o mesmo estudo em aterros sanitários onde não ocorra a recirculação do lixiviado com a finalidade de estudar a real interferência do tempo de disposição dos resíduos na composição do biogás.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, I. R. F. S., **Análise experimental do potencial de geração de biogás em resíduos sólidos urbanos. Dissertação** (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pernambuco UFP, Recife, 2008.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS – ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2011**. São Paulo: 2012. Disponível em <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2011.pdf>>. Acesso em 20 set. 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. *NBR 8419*: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos. São Paulo, 1984.
- BILGILI, M. S.; DEMIR, A.; OZKAYA, B. **Quality and Quantity of Leachate in Aerobic Pilot-Scale Landfills**. Springer Science+Business Media. Environmental Management Vol. 38, No. 2, p. 189–196, 2006.
- BINGEMER, H. G.; CRUTZEN, P. J. **The Production of Methane From Solid Waste**. Journal of Geophysical Research, Vol 92, n. D2, p. 2181-2187, 1987.
- BRASIL. Lei n 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 03 out. 2012.
- BRAZ, J. A. **Avaliação do potencial energético do biogás de aterro sanitário gerado pelos resíduos sólidos domésticos do município de Rio Claro**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 21, 2001, João Pessoa/PB. Anais. João Pessoa: ABES, 2001.
- BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. Dissertação** (Mestre em Ciências de Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- CASTRO, M. C. A. A. de. **Avaliação de um sistema australiano de lagoas no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados**. 246 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2001
- CASTRO, M. C. A. A.; SCHALCH, V; LEITE, W.C.A. **Adequacy and application of estimated methods of generation rate of leachete in the operational conditional of landfill in Brazil**. In: 20th Sardinia Symposium-Eleventh International Waste Management

and Landfill Symposium, 2007, S.Margherita di Paula-Cagliari. Anais do Eleventh International Waste Management and Landfill Symposium. , 2007.

- CASTRO, M.C.A.A; BELLO, P.P.G. **Evaluation of percentage of methane gas generated in the landfill of the Rio Claro city, Brazil: study of energetic potential.** In: Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste, 2010, Veneza. Third International Symposium on Energy From Biomass and Waste. Padova: Eurowaste-IWWg, 2010. v.1
- CATAPRETA, C.A.A., SIMÕES, G.F. (2009). **Monitoramento da qualidade do biogás gerado em aterro sanitário experimental.** 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- CHAN, G. Y. S., CHU, L. M., WONG, M. H., 2002. **Effects of leachate recirculation on biogas production from landfill co-disposal of municipal solid waste, sewage sludge and marine sediment.** Environmental Pollution.
- CORA, M. G. **Increasing Business Value With Landfill Gas-to-Energy Projects: Environmental Issues and Implications.** Wiley InterScience p. 17-27, 2008.
- CORREIA, C. **Aterro sanitário de Rio Claro é um dos piores da região. Rio Claro, 2012.** Acesso em 30 de maio de 2012. Disponível em <<http://diariodorioclaro.com.br/2012/05/02/aterro-sanitario-de-rc-e-um-dos-piores-da-regiao-82555/>>.
- DIAS, V. C. F.; PASSOS, R. V.; OLIVEIRA, D. M.; BELLI FILHO, P.; CASTILHOS, A. B. (2009). **Diagnóstico da Geração e do Potencial Energético de Biogás no Aterro Sanitário de Içara/SC.** 25º Congresso Brasileiro de Engenharia 51 Sanitária e Ambiental.
- ENSINAS, A. V. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário Delta em Campinas – SP.** 143 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003
- FRÉSCA, F. R. C. **Estudo da geração de resíduos sólidos domiciliares no município de São Carlos, SP, a partir da caracterização física.** Dissertação (Mestrado em Ciências da Engenharia Ambiental) – Universidade de São Paulo – USP, São Carlos, 2007.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em 26 de setembro de 2012.

- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. IBGE Cidades. 2010. Disponível em <<http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>>. Acesso em 15 de maio de 2012.
- IPT (2000) – Manual de Gerenciamento Integrado do Lixo Municipal. 2^a edição. São Paulo, CEMPRE, 2000. p 37.
- KARTHIKEYAN, O. P.; SWATI, M.; NAGENDRAN, R.; JOSEPH, K. **Performance of bioreactor landfill with waste mined from a dumpsite**. Springer Science+Business Media . p. 141-151. 2007.
- LEITE, L. E. H. B. C., MAHLER, C. F., BRITO FILHO, L. F. (2005). **Avaliação do potencial de receitas derivadas do biogás de aterros**. 23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- LIANG, M; CHEN, W. **The Investigation of Methane Concentration Derived from Municipal Solid Waste Landfill**. College of Environmental Science and Engineering. Taiyuan University of Technology, 2011.
- MACIEL, F. J.; JUCÁ, J. F. T.; ALVEZ, I. R. F. S.; LOPES, R. L.; NOGUEIRA, G. A. B. **Bioenergia a partir de um aterro se resíduos sólidos urbanos no Brasil**. (2009). 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- MACIEL, F.J. (2003). **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE**. Dissertação de Mestrado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 173p.
- MATOS, A. R. V. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos**. 131p. Dissertação (Mestre em Engenharia Ambiental). Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa. Lisboa, 2008.
- McBEAN, E.A.; ROVERS, F.A.; FARQUHAR, G.J. Solid Waste Landfill Engineering and Design. Prentice Hall: 2005. p. 521.
- MEDINA, M. **Solid Waste Management In Amman**. BioCycle Global. Out. 2011.
- MENDES, L. G. G. **Proposta de um sistema para aproveitamento energético de um aterro sanitário regional na cidade de Guaratinguetá**. 179 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2005.
- MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA – MCT. **Inventário Brasileiro das Emissões e Remoções Antrópicas de Gases de Efeito Estufa**. 16 p. Disponível em:

<http://www.oc.org.br/cms/arquivos/inventa%C2%A1rio_emissa%C2%B5es_gee-valores_preliminares-25-11-2009.pdf>. Acesso em: 10 mai 2012.

- Ministério das Cidades – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. **Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos 2010**. Brasília, 2012. Disponível em <<http://www.snis.gov.br/PaginaCarrega.php?EWRErterterTERTer=93>>. Acesso em 26 de setembro de 2012.
- PELCZAR JR, M.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 2. ed. São Paulo: MAKRON Books, 1996. Vol. II. 517 p.
- PINOTTI, C.; GIMENEZ, J. R.; SCHNEIDER, V. E.; SILVA, M. D. (2009). **Sistema de coleta e tratamento integrado de efluentes de suinocultura com geração de créditos de carbono e biogás no município de Santa Tereza/RS**. 25º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental.
- POHLAND, F. G.; GOULD, J. P. **Co-disposal of municipal refuse and industrial waste sludge in landfills**. *Water Science Technology*. v.18, n.12, p.177-192. (1986).
- POHLAND, F.G.; HARPER, S.R. *Critical review and summary of leachate and gas production from landfills*. Tech. project n.E20 G01, dec. (1985).
- RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR – RAP. **Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP**. Ação engenharia. São Paulo – SP.
- SILVA, T. N. **Diagnóstico da produção de biogás em um aterro sanitário: estudo do caso no aterro bandeirantes**. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologia Ambiental) – Universidade do Vale do Itajaí – UNIVALI, Itajaí, 2006
- TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. USA: McGraw-Hill, 1993. 978 p.
- TROPPEMAIR, H. **Atlas da Qualidade Ambiental e de Vida de Rio Claro**. 1992.
- VILAS BOAS, D. M. F. Estudo da microbiótica anaeróbia hidrolítica-fermentativa em aterro sanitário. 157p. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento). Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo, São Carlos, 1990.
- ZENG, X.; DING, W.; LONG, T.; ZHANG, L.; LIN, C. **Influence of landfill structures of stabilization of fully recycled leachate**. J. Cent South Univ. Technol. Chongquin, China. Vol. 13, n. 3, p. 321-324, 2000.