

Trabalho de Formatura

Curso de Graduação em ENGENHARIA AMBIENTAL

UTILIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUALITATIVOS DOS RESÍDUOS ATERRADOS  
COMO REFERÊNCIA NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE VALORES EMPREGADOS EM  
MODELOS MATEMÁTICOS PARA A ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO

Natasha Pereira Marques

Rio Claro (SP)

2012

NATASHA PEREIRA MARQUES

**UTILIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUALITATIVOS  
DOS RESÍDUOS ATERRADOS COMO REFERÊNCIA  
NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE VALORES  
EMPREGADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS PARA  
A ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO**

*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 Engenheiro  
Ambiental.*

Orientador: Nelson Callegari Júnior

Rio Claro (SP)  
2012

604.6 Marques, Natasha Pereira  
M357u Utilização de parâmetros qualitativos dos resíduos aterrados como referência no processo de seleção de valores empregados em modelos matemáticos para a estimativa de geração de metano / Natasha Pereira Marques. - Rio Claro : [s.n.], 2012  
54 f. : il., figs., tabs.

Trabalho de conclusão de curso (Engenharia ambiental) -  
Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas  
Orientador: Nelson Callegari Júnior

1. Resíduos. 2. Aterros sanitários. 3. Modelagem. 4. Biogás. 5.  
Resíduos sólidos urbanos. I. Título.

Ficha Catalográfica elaborada pela STATI - Biblioteca da UNESP  
Campus de Rio Claro/SP

NATASHA PEREIRA MARQUES

UTILIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUALITATIVOS DOS  
RESÍDUOS ATERRADOS COMO REFERÊNCIA NO PROCESSO  
DE SELEÇÃO DE VALORES EMPREGADOS EM MODELOS  
MATEMÁTICOS PARA A ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE  
METANO

*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 Engenheiro  
Ambiental.*

Comissão Examinadora  
Prof. Dr. Nelson Callegari Júnior (orientador)  
Prof. Dr. Marcus Cesar A. A. de Castro  
Prof. Dr. Valdir Schalch

Rio Claro, 07 de dezembro de 2012.

  
Natasha Pereira Marques

  
Nelson Callegari Júnior

*Ao meu irmão, que ainda está  
começando sua jornada, que o fim dessa etapa  
da minha vida sirva de inspiração para o seu sucesso.*

## AGRADECIMENTOS

Agradeço,

Ao meu professor orientador Nelson Callegari, pela paciência, compreensão e apoio em toda esta pesquisa. Seu esforço em me ajudar e orientar colaborou muito para meu desenvolvimento profissional.

Ao meu professor orientador de iniciação científica Marcus Castro, que além de ministrar as melhores aulas do curso, me ensinou que não existe caminho para conquistas sem muito empenho e dedicação. "Se o esforço não mata! Então fortalece, traz confiança e segurança para novos desafios".

Ao meu grupo de pesquisa no aterro sanitário de Rio Claro – SP, Sarita Magnan, Bruno Zanatta, Prof. Valdir Schalch, Prof. Wellington Cyro, Prof. Marcus Castro, que em um ambiente de trabalho divertido e amigável realizou uma pesquisa séria, com resultados consistentes.

Aos meus pais e irmão, Adriana, Rinaldo e Yago Marques, que sempre apoiaram as minhas decisões e nunca me deixaram desistir. Pai, obrigada pelas horas perdidas estudando comigo, essas foram cruciais para a minha formação. Mãe, obrigada por todas as conversas, pelo carinho, amor e dedicação.

A minha grande família de sangue e de consideração, cuja intensa convivência ao longo desses anos me proporcionou momentos inesquecíveis e me trouxe até esse momento. Agradeço especialmente à minha avó, Vera Malfa, minha pessoa, minha companheira de aventuras, que sempre me apoiou e faz de tudo para me ver feliz.

Aos meus amigos de infância, Babi, Alex e Chaves, por terem a maior paciência do mundo comigo e sempre estarem ao meu lado, independentemente de quantas vezes eu estivesse ausente.

As amigas que as ocasiões da vida me apresentaram, Kim van der Horst, Natani Pereira, Renata Malfa e Grace Cury, pelos momentos únicos de cumplicidade, cada uma delas tem um espaço especial no meu coração. E ao meu amigo bandeirantino, Victor Haim.

Aos meus colegas do curso de Engenharia Ambiental e principalmente da minha turma 2008, uma sala que sempre se respeitou e se manteve unida ao longo de toda graduação. Agradeço principalmente aos amigos Eduardo Almeida, Paulo Eduardo, Marcos Destri e Fernanda Zamboninni.

As minhas companheiras de república, Sarita Magnan, Elis Pacola, Luana Kwai, Rafaella Lange, por me acolherem na família Trindade na hora que eu mais precisava. Foi

com elas que eu estudei para as provas, me diverti nas festas, dei risada todas as noites e chorei nos momentos difíceis. Minhas irmãs de alma.

Aos meus companheiros de EJEAmb, por me tornarem uma pessoa melhor. A EJ me preparou para o mercado de trabalho, me inspirou e desafiou a ser sempre mais. Não existem palavras para descrever o quanto eu cresci como pessoa e profissionalmente ao longo desses três anos de muito trabalho na EJEAmb. Agradeço especialmente aos amigos da diretoria de projetos Luis Henrique, Ana Clara Cassanti e Lucilla Dias.

A tia Samira, tio Fernando, Luís, Carolina, que sempre me acolheram de braços abertos e com muito amor todas as milhares de vezes que eu fui para Goiânia.

Aos trabalhadores do aterro sanitário de Rio-Claro, Jorge Jose Zuizke, Vilson Roberto de Lima, Maurício Ceroweira Trindade, Mario Aparecido Andreatto, Antonio Arnoldo Andrade 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

Ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, que permitiu que essa pesquisa fosse possível.

## RESUMO

O estudo da modelagem matemática auxilia na avaliação da capacidade de produção e quantificação do tempo de geração de biogás em aterros sanitários, viabilizando a implantação de projetos de aproveitamento energético do metano. Assim, o trabalho desenvolvido tem como objetivo, mediante a simulação de cenários do potencial de geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro, a utilização dos dados de campo de vazão de metano e dos parâmetros dos resíduos aterrados como referências para a seleção de valores de  $k$  e  $L_0$  utilizados para estimativa de geração de metano no modelo LandGEM. Como resultado observou-se que quando comparadas as características adotadas nos quatro cenários recomendados pela bibliografia da USEPA com as encontradas no aterro sanitário de Rio Claro (elevada quantidade de matéria orgânica do resíduo aterrado e a prática diária de recirculação do lixiviado), o cenário que melhor representaria a taxa de geração de metano é o cenário 01, com  $k = 0,7$  e  $L_0 = 96$ . Com relação ao ajuste dos parâmetros em relação aos dados de campo de vazão de metano, o valor de  $L_0$  que melhor se enquadra à geração de metano do aterro sanitário de Rio Claro é 150, enquanto para  $k$ , o comportamento da reta que melhor representa à realidade são os valores entre 0,7 e 0,3. Em relação aos parâmetros dos resíduos aterrados, dentre os valores sugeridos de  $k$  o 0,3 é o mais coerente com o nível de degradação biológica intermediária do resíduo aterrado, enquanto para  $L_0$  em função da biodegradabilidade do resíduo, um novo valor entre 120 e 150 pode ser ainda mais apropriado para o estudo.

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



## ABSTRACT

The study of mathematical modeling assists in evaluation of the capacity of production and measurement of generation time of biogas in landfills, enabling the implantation of projects of energy generation from methane. Thus, the work aims, by simulating scenarios of potential methane generation in the landfill in Rio Claro, the use of field data from methane flow and waste grounded parameters as references for selecting values of  $k$  e  $L_0$  used to estimate methane generation model in LandGEM. As a result it was found that compared the characteristics adopted in the four scenarios recommended by the USEPA literature with those found in the landfill of Rio Claro (high amount of organic matter in the waste landed and daily practice of leachate recirculation), the scenario that apparently better represent the rate of methane generation is the scenario 01, with  $k = 0.7$  and  $L_0 = 96$ . Now, the adjustment of parameters in relation to the data field of methane flow, the value of  $L_0$  which best fits the methane generation from the landfill in Rio Claro is 150, while for  $k$  the line behavior that best represents the reality are values between 0.7 and 0.3. Regarding the parameters of the waste grounded, between the suggested values of  $k$ , 0,3 is most consistent with the intermediate level of biological degradation of the residue grounded, while  $L_0$  due to the biodegradability of the waste, a new value between 120 and 150 may be more appropriate for the study.

**Keywords:** Modeling, Methane, Solid Waste, Sanitary Landfill.

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1:</b> Processo de tratamento do resíduo domiciliar desde sua geração até a disposição final.....	18
<b>Figura 2:</b> Variações de parâmetros indicadores das fases de estabilização da matéria orgânica em um aterro sanitário .....	19
<b>Figura 3:</b> Geração de metano em m <sup>3</sup> do aterro de Nova Iguaçu-RJ – metodologias do Banco Mundial (BM), USEPA (EPA) e IPCC, dispondo a vazão de metano em vazão de CH <sub>4</sub> . .....	26
<b>Figura 4:</b> Perfis da geração de gás para L <sub>0</sub> = 150 m <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> /t. RSD e diferentes valores de k...29	
<b>Figura 5:</b> Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário de Timbó para três cenários. .29	
<b>Figura 6:</b> Produção estimada de metano com parâmetros médios observados com e sem recirculação.....	30
<b>Figura 7:</b> Aterro sanitário municipal de Rio Claro – SP. ....	31
<b>Figura 8:</b> Caminhão tanque realizando a recirculação do lixiviado na superfície do aterro e o solo encharcado logo após a prática. ....	32
<b>Figura 9:</b> Locais de coleta em relação à área do aterro; A -“área R1” próxima ao dreno 19; B- “área R2” próxima ao dreno 05; C- “área R3” próxima ao dreno 28;.....	34
<b>Figura 10:</b> Perfuração da massa de resíduos para a coleta de amostras. ....	35
<b>Figura 11:</b> Medição da temperatura dos resíduos aterrados em diversas profundidades, a foto A é caracterizada por um resíduo mais superficial ”novo”, a foto B um resíduo “intermediário” e na foto C um resíduo “antigo”. ....	35
<b>Figura 12:</b> Amostra dos resíduos acondicionados.....	36
<b>Figura 13:</b> Imagem do aterro sanitário de Rio Claro - SP com a localização dos drenos de gás e com a nova área de disposição de resíduos destacada em amarelo. ....	37
<b>Figura 14:</b> A – termo anemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1; B- “chaminés” confeccionadas no tamanho dos drenos existentes no aterro; C- Medição da velocidade do biogás no dreno.....	38
<b>Figura 15:</b> A – Apagando o fogo dos drenos com panos molhados; B- selamento do dreno com plástico filme; C – Medição da concentração do biogás com o equipamento LANDTEC GEM-2000.....	39
<b>Figura 16:</b> Projeção dos quatro cenários recomendados pela literatura da USEPA para estimativa da taxa de geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro.....	42
<b>Figura 17:</b> Correlação entre os valores do modelo e os dados de campo do aterro sanitário. 43	

<b>Figura 18:</b> Resultados do modelo para os cenários 01( $L_0=96$ ) e 02( $L_0=100$ ) correlacionados com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro.....	44
<b>Figura 19:</b> Resultados do modelo para os cenários 03( $L_0=120$ ) e 04( $L_0=150$ ) correlacionados com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro.....	45
<b>Figura 20:</b> Resultados do modelo para o cenário 05( $L_0=170$ ) correlacionado com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro. ....	46
<b>Figura 21:</b> Comparação entre a taxa de geração de metano dos cenários determinados pelos dados de campo e pela bibliografia. ....	47
<b>Figura 22:</b> Índices de DBO/DQO, DQO/100, SVT/ST e SFT/ST obtidos nas análises das amostras dos resíduos aterrados do aterro sanitário de Rio Claro.....	49

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1:</b> Correlação entre a razão de STV/ST com a biodegradabilidade do resíduo presente no aterro sanitário.....	21
<b>Tabela 2:</b> Composição média do biogás.....	21
<b>Tabela 3:</b> Valores da constante de biodegradação (k) e do potencial de geração do biogás ( $L_0$ ) dado por diversas metodologias. ....	25
<b>Tabela 4:</b> Correlação e seleção dos parâmetros em função dos indicadores de qualidade.....	36
<b>Tabela 5:</b> Parâmetros dos solubilizados e os métodos de análise.....	37
<b>Tabela 6:</b> Descrição dos cenários estudados e variação determinada da constante de biodegradação (k) e do potencial de geração de biogás ( $L_0$ ).....	40
<b>Tabela 7:</b> Fluxo de disposição de resíduos no aterro municipal de Rio Claro de 2001 a 2012. ....	40
<b>Tabela 8:</b> Seleção dos valores de k para simulação com os valores de $L_0$ inferidos por meio de dados de campo dos resíduos aterrados do aterro.....	41
<b>Tabela 9:</b> Resultados das análises de laboratório do resíduo aterrado e os índices de biodegradabilidade dos resíduos.....	48

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BM	Banco Mundial
CESTESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
GPS	Global Positioning System
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IQR	Índice de Qualidade de Resíduos
Km	Quilômetros
m	metros
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
Namoniacal	Nitrogênio Amoniacal
NTK	Nitrogênio Total Kjeldhal
PNRS	Plano Nacional dos Resíduos Sólidos
RAP	Relatório Ambiental Preliminar
SEPLADEMA	Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente
SFT	Sólidos Fixos Totais
SMA	Secretaria de Estado do Meio Ambiente
ST	Sólidos Totais
SVT	Sólidos Voláteis Totais
t	toneladas
USEPA	United States Environmental Protection Agency

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	15
<b>2 OBJETIVOS</b> .....	16
<b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	17
3.1 Resíduos sólidos domiciliares e sua disposição em aterros sanitários.....	17
3.2 Degradação dos resíduos no aterro .....	19
3.3 Características e produção do biogás em aterros sanitários.....	21
3.4 Modelos matemáticos para a estimativa do potencial de geração de metano em aterros sanitário .....	24
3.4.1 Modelo LandGEM da USEPA.....	27
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	31
4.1 Caracterização da área de estudo.....	31
4.2 Coleta de amostras de resíduos aterrados .....	33
4.3 Práticas utilizadas para medição do gás metano no aterro.....	37
4.4 Aplicação do Modelo LANDGEM.....	39
4.4.1 Análise do comportamento do modelo LandGEM para diferentes cenários com valores de $k$ e $L_0$ recomendados pela bibliografia.....	39
4.4.2 Ajuste dos parâmetros $k$ e $L_0$ do modelo LandGEM a partir dos dados de campo de geração de metano do aterro de Rio Claro.....	41
<b>5 RESULTADOS</b> .....	42
5.1 Simulação do Modelo LandGEM para diferentes cenários.....	42
5.2 Estimativa dos parâmetros $k$ e $L_0$ do modelo LandGEM a partir dos dados de campo de geração de metano do aterro de Rio Claro.....	43
5.3 Análise da consistência dos valores de $k$ e $L_0$ obtidos com os índices de biodegradabilidade do resíduo aterrado.....	48
<b>6 CONCLUSÕES</b> .....	51
<b>7 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS</b> .....	52
<b>8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	53

## 1 INTRODUÇÃO

O aterro sanitário, tanto do ponto de vista econômico como ambiental, é a solução para a disposição final dos resíduos sólidos urbanos. Contudo a decomposição da matéria orgânica gera subprodutos como o biogás, composto por metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), os dois principais gases responsáveis pelo efeito estufa. As emissões de metano provenientes de aterro sanitário são tão significativas que representam cerca de 6 a 20 % do total das emissões globais pelas fontes antropogênicas (IPCC, 1995 apud CETESB, 2006).

Dessa forma, a possibilidade de aproveitamento energético do gás metano gerado nos aterros sanitários é uma alternativa tanto para a diminuição da geração de gases que agravam o efeito estufa quanto para a utilização de fontes alternativas de energia. Para viabilizar a implantação de projetos de geração de energia a partir do biogás, é necessária a utilização da modelagem como uma ferramenta capaz de avaliar não só a capacidade de produção, mas também quantificar o tempo de geração após o encerramento do aterro sanitário. Assim, a modelagem pode ser aplicada ao problema, com a finalidade de estimar a geração de gases, simulando cenários que permitam a avaliação do potencial energético de cada aterro.

Atualmente, os modelos e as equações utilizadas baseiam-se em parâmetros e estudos internacionais, o que gera diferenças notáveis nas características e nas condições de geração de gases dos aterros brasileiros. Mesmo a literatura propondo uma ampla faixa de valores para os parâmetros que teoricamente representam às condições climáticas do Brasil, segundo Bello e Castro (2010) as características climáticas, a alta porcentagem de matéria orgânica presente nos resíduos e a carência de trabalhos de calibração em escala real de tais modelos criam condições específicas que dificultam a aplicação segura desta ferramenta.

Nesse sentido, o trabalho desenvolvido propõe utilizar os dados de campo de vazão de metano e os parâmetros dos resíduos aterrados como referências para a seleção de valores de  $k$  e  $L_0$  utilizados para estimativa de geração de metano no modelo matemático Landfill Gas Emission Model (LandGEM)

Com os resultados obtidos pela aplicação do modelo matemático no aterro sanitário municipal de Rio Claro- SP realizou-se uma comparação com valores de vazão medidos em campo, de forma a permitir a calibração final do modelo e sua correlação com os parâmetros analisados dos resíduos aterrados. Tal avaliação poderá subsidiar estudos mais acurados sobre o potencial de aproveitamento energético dos gases gerados em aterros sanitários.

## 2 OBJETIVOS

A pesquisa tem por objetivo geral avaliar o potencial de geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro mediante simulação de cenários via aplicação do modelo LandGEM adaptado pela CETESB.

Nesse sentido, a presente pesquisa tem por objetivos específicos:

- Simular cenários para a estimativa do potencial de geração de metano a partir dos parâmetros recomendados pela bibliografia.
- Determinar e ajustar os parâmetros  $k$  e  $L_0$  do modelo LandGEM a partir dos valores de vazão do metano obtidos em campo;
- Analisar a coerência entre o cenário gerado pelos valores de campo e o cenário proposto pela bibliografia para as características do aterro estudado.
- Avaliar a aderência entre os indicadores da relação de DBO/DQO e STV/ST dos resíduos aterrados com os valores adotados de  $k$  e  $L_0$ , respectivamente.



### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 *Resíduos sólidos domiciliares e sua disposição em aterros sanitários*

O crescimento demográfico, associado às mudanças de hábitos, melhoria da qualidade de vida e desenvolvimento industrial causou um aumento na quantidade gerada de resíduos. Aumento que agregado à dificuldade de se encontrar áreas disponíveis para a disposição final de resíduos, agravou a problemática envolvendo a disposição dos resíduos sólidos urbanos.

Segundo a Lei 12305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), regulamentada pelo Decreto 7.404 de 23 de dezembro de 2010, os resíduos sólidos são:

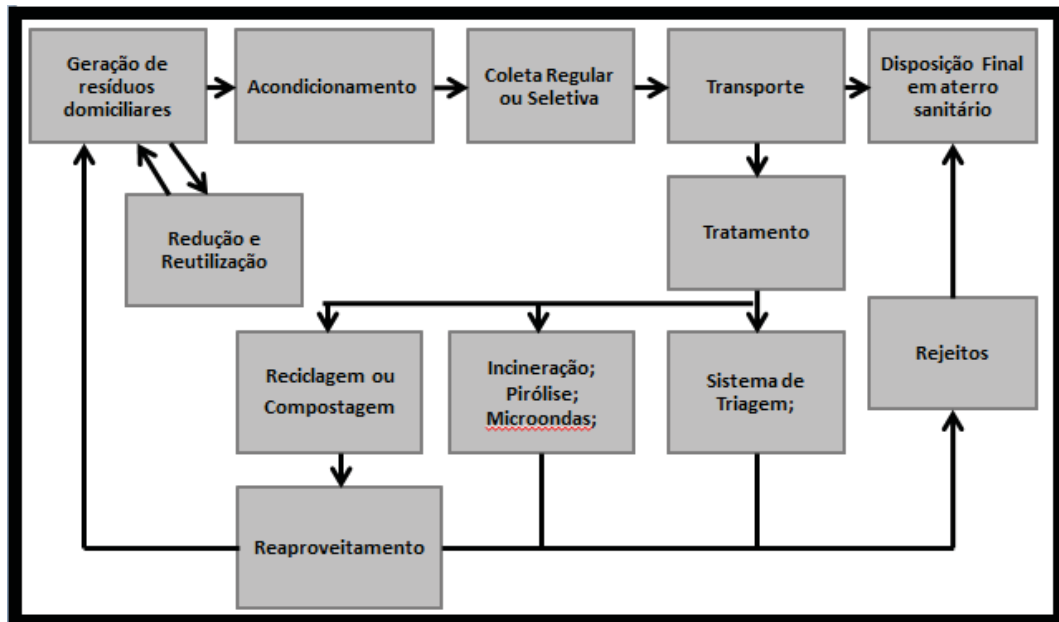
qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem 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 e os resíduos de limpeza urbana. Os resíduos domiciliares são aqueles originados na vida diária das residências e, no comércio, constituídos por restos de alimentos (matéria orgânica), papéis, papelão, jornais e revistas, plástico, vidros, entre outros.

No caso do Brasil, a composição dos resíduos sólidos domiciliares é predominante de materiais orgânicos, ou seja, substâncias provenientes de animais e vegetais, diferentemente de países desenvolvidos, como os Estados Unidos, em que a proporção de materiais descartáveis – como plástico, papel, papelão, vidro e metal – é maior.

Segundo o IBGE (2010), são geradas 183.488 toneladas diárias de resíduos domiciliares no Brasil, sendo que segundo a CETESB (2010) nos municípios do Estado de São Paulo a geração “per capita” de resíduos varia de 0,4 Kg/(habitante.dia), para municípios com até 100.000 habitantes, à 0,7Kg/(habitante.dia) em municípios com mais de 500.000 habitantes.

Os resíduos domiciliares após serem segregados na fonte e dispostos para a coleta passam por um processo de tratamento, que envolve uma série de procedimentos destinados a reduzir a quantidade e o potencial poluidor dos resíduos gerados. Tal processo é finalizado na única forma de disposição final ambientalmente adequada dos resíduos domiciliares: o aterro sanitário, conforme o Figura 1.



**Figura 1:** Processo de tratamento do resíduo domiciliar desde sua geração até a disposição final.

No estado de São Paulo, a qualidade do local de disposição dos resíduos é avaliada por meio do Índice de Qualidade de Resíduos (IQR). Tal índice é determinado comparando-se critérios técnicos de engenharia determinados para a construção e operação de aterros com as boas práticas de execução e operação de aterros existentes. Assim, são avaliados critérios como a adoção de dispositivos de revestimento de fundo para prevenir contaminação do subsolo e das águas subterrâneas, a utilização de sistemas de coletas de líquidos percolados e gases gerados, a utilização de sistemas de cobertura final que minimizem as infiltrações e os problemas de erosão, a por fim a adoção de dispositivos de drenagem superficial que minimizem o fluxo de água para o interior da massa de resíduos (Pirbazari et al., 1996 apud MORAIS, 2005).

Com a avaliação das condições ambientais em função dos critérios citados, o IQR classifica os locais de disposição dos resíduos em três faixas de enquadramento:

- ✓ Locais de disposição com “condições inadequadas” denominados lixões ou vazadouros a céu aberto
- ✓ Locais de disposição com “condições controladas” chamados de aterros controlados
- ✓ Locais de disposição com “condições adequadas” denominados aterros sanitários.

### 3.2 Degradação dos resíduos no aterro

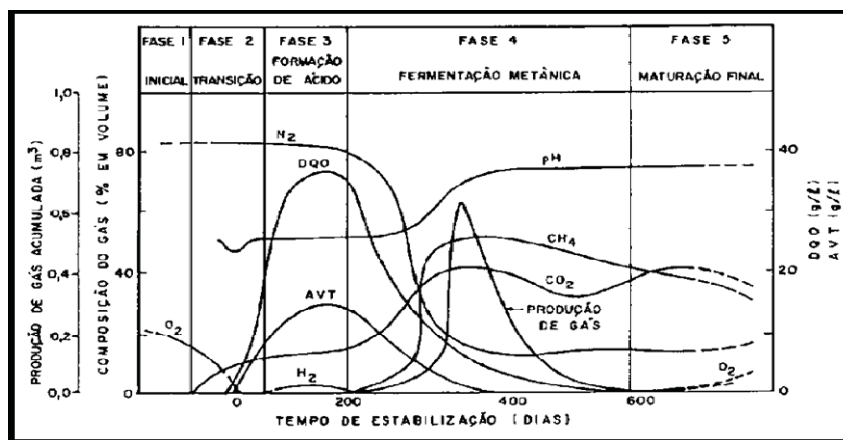
Segundo Castilhos Jr. et al. (2003), o processo de degradação dos compostos orgânicos e inorgânicos, constituintes dos resíduos aterrados, é um fenômeno constituído essencialmente pela superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos, catalisados pelo fator água.

Esses mecanismos são capazes de converter por meio da atuação de microrganismos decompositores (bactérias, fungos, protozoários e algas) os resíduos sólidos em substâncias mais simples (FIORE, 2004).

A decomposição da matéria orgânica em aterros ocorre por dois processos, o primeiro de decomposição aeróbia presente normalmente no período inicial de deposição do resíduo e o segundo de decomposição anaeróbia, que se inicia após a redução do oxigênio. (BORBA, 2006).

A aerobiose no processo de biodecomposição dos resíduos ocorre de forma acelerada por meio de bactérias que se desenvolvem rapidamente até a extinção do oxigênio disponível. Já a decomposição anaeróbia é uma etapa mais complexa e lenta que envolve normalmente quatro fases de decomposição: a hidrólise e as fases acidogênica, acetogênica e metanogênica. (AUDIBERT, 2011)

Para melhor representação de todo processo de degradação dos resíduos no aterro, foi proposto por Pohland e Gould (1986), a partir do estudo dos dados de decomposição da resíduo em um reator anaeróbio obtidos em laboratório, um modelo composto por cinco fases, conforme ilustrado na Figura 2 a seguir.



**Figura 2:** Variações de parâmetros indicadores das fases de estabilização da matéria orgânica em um aterro sanitário

**Fonte:** Pohland e Gould (1986).

**Fase I: Ajuste inicial.** Os resíduos são depositados no aterro e após a execução da camada de cobertura, a fração biodegradável do resíduo sofre por um período de poucos dias sua decomposição biológica em condições aeróbias.

**Fase II: Transição.** Os níveis de oxigênio decrescem e começa a fase anaeróbia. Enquanto o aterro é convertido em anaeróbio, o nitrato e o sulfato, que podem servir como receptores de elétrons em reações de conversão biológica, frequentemente são reduzidos a gás nitrogênio e sulfuro de hidrogênio. O início das condições anaeróbias pode ser verificado através do potencial de oxidação e redução que possui o resíduo.

**Fase III: Ácida.** As reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio. A acidogênese envolve a conversão microbiológica dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários com baixa massa molecular, como o ácido acético ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos.

**Fase IV: Metanogênica:** Na fase de fermentação do metano predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$ . A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente.

**Fase V: Maturação.** Ocorre após grande parte de o material ter sido biodegradado e convertido em  $\text{CH}_4$  e  $\text{CO}_2$  durante a fase metanogênica. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta.

A duração de cada fase variará conforme a umidade da massa de resíduos, a distribuição dos componentes orgânicos no aterro e a disponibilidade de nutriente. Os fatores citados podem ser expressos pela biodegradabilidade do resíduo.

Já que a biodegradabilidade é definida como a fração máxima de matéria orgânica eliminada em comparação à fração teórica estequiometricamente convertida, por digestão aeróbia ou anaeróbia, durante um determinado período de tempo e em determinadas condições operacionais. (ROZZI et al, 2004).

No caso do resíduo aterrado os principais indicadores de biodegradabilidade são as relações de DBO/DQO e STV/ST. Tais relações também são utilizadas para inferência da biodegradabilidade do lixiviado. Segundo Schalch (1984), o lixiviado é um líquido escuro com alto potencial poluidor decorrente da decomposição anaeróbia dos resíduos aterrados com a água de chuva infiltrada ao longo do corpo do aterro.

A **relação DBO/DQO** é um indicador do nível de degradação biológica, no qual possivelmente quanto menor o tempo de disposição do resíduo maior o valor do quociente da relação. De acordo com Tchobanoglous (1993), aterros novos possuem relação DBO/DQO na ordem de 0,7 enquanto que em aterros antigos esta relação se aproxima de 0,2.

A **relação de STV/ST** representa a quantidade de matéria orgânica, representada pelos sólidos voláteis, com capacidade de biodegradação em relação à concentração de sólidos fixos. Assim, Contrera (2008) ao definir a correlação dos valores da razão de STV/ST com a capacidade de biodegradabilidade do resíduo apresentou resultados, no qual a maior razão entre os parâmetros indica uma maior biodegradabilidade do resíduo. A Tabela 1 é apresentada a seguir.

**Tabela 1:** Correlação entre a razão de STV/ST com a biodegradabilidade do resíduo presente no aterro sanitário.

Relação de STV/ST	Biodegradabilidade
Até 0,3	Baixa
0,3-0,4	Média
Acima de 0,4	Alta

**Fonte:** Adaptado de Contrera (2008).

### 3.3 Características e produção do biogás em aterros sanitários

O biogás é um gás incolor e de baixa densidade. Composto de vários gases que incluem o amoníaco ( $\text{NH}_3$ ), o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), metano ( $\text{CH}_4$ ), nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) e oxigênio ( $\text{O}_2$ ). A composição média da mistura gasosa, segundo levantamento realizado por Azevedo apud PIEROBON, 2007 é apresentada na Tabela 2.

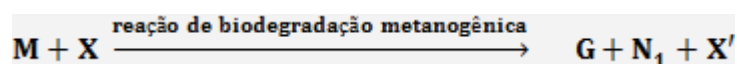
**Tabela 2:** Composição média do biogás.

Substância	Percentual de volume molar
Metano ( $\text{CH}_4$ )	55 a 75 %
Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ )	25 a 45 %
Nitrogênio ( $\text{N}_2$ )	0 a 3 %
Oxigênio ( $\text{O}_2$ )	0 a 1 %
Sulfeto de Hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ )	0 a 1 %
Amoníaco ( $\text{NH}_3$ )	0 a 0.5 %
Monóxido de Carbono ( $\text{CO}$ )	0 a 0.1 %

**Fonte:** Azevedo (2000) apud PIEROBON (2007).

O processo de produção do biogás depende de diversos parâmetros, incluindo a composição dos resíduos, umidade de constituição, tamanho das partículas, a idade do resíduo, pH, temperatura, e outros (McBean et al., 1995 apud BRITO FILHO, 2005). Como os parâmetros citados variam em função da fase de degradação dos resíduos a fim de se obter a taxa de produção de biogás com precisão seria necessário resolver as equações do processo de biodegradação dos resíduos no aterro. Contudo em função da dificuldade de tal equação, segundo Silva (2010) a produção total de biogás é também pode ser obtida conforme o processo descrito abaixo, a partir da propensão de produção de gás das diversas substâncias orgânicas que compõem os resíduos sólidos urbanos.

Assim, a reação de biodegradação produtora de biogás pode ser representada por:



onde M é a massa de resíduo depositada; X e X' são as quantidades de microrganismos responsáveis pela decomposição dos resíduos orgânicos, antes e depois da reação de biodegradação; N<sub>1</sub> é a massa de produtos biodegradados inertes (que não produzem mais gás); G é a massa de gás produzida.

Considerando que a probabilidade por unidade de tempo de ocorrer à biodegradação dos resíduos e a produção de biogás é caracterizada por uma constante de biodegradação [anos<sup>-1</sup>] denominada k, tem-se no problema de valor inicial a massa de resíduo ainda passível de biodegradação no ano t:

$$\frac{dM}{dt} = -kM(t), \quad M(t') = M_{t'}. \quad (3.1)$$

Resolvendo esta equação, supondo que no ano t' tenha sido depositado M(t'), no ano t teremos:

$$\mathbf{M(t) = M(t') \cdot e^{-k(t-t')}}. \quad (3.2)$$

A taxa de produção de biogás por ano, r(t), expressa em [mol de metano/ano] ou [kg de metano/ano] ou [m<sup>3</sup> de metano/ano] pode ser obtida por meio de k, pois uma fração da biodegradação eventualmente leva a produção de gás. A taxa de produção de biogás pode ser escrita como:

$$r(t) = kL_0 M(t). \quad (3.3)$$

Onde  $L_0$  é o potencial de geração de biogás do resíduo em [mol de metano/t RSU]. A taxa de produção de biogás no ano  $t$ , devido a uma deposição de massa  $M(t')$  de resíduo no ano  $t'$  é dada por:

$$r(t) = kL_0 M(t') \cdot e^{-k(t-t')}. \quad (3.4)$$

Como  $t'$  é o instante de tempo onde se tem a deposição de massa de resíduo (DMR). Considera-se  $r$  como uma função DMR( $t'$ ):

$$r = r(t') \quad (3.5)$$

$$dr = \frac{dr}{dt'} dt' \quad (3.6)$$

$$\frac{dr}{dt'} = kL_0 \left\{ \frac{dM(t')}{dt'} \cdot e^{-k(t-t')} + M(t') k e^{-k(t-t')} \right\} \quad (3.7)$$

$$dr = kL_0 \left( \frac{dM(t')}{dt'} + M(t') k \right) e^{-k(t-t')}, \text{ com } \left( \frac{dM(t')}{dt'} + M(t') k \right) = \dot{M}(t') \quad (3.8)$$

A função  $r(t)$  permite que se obtenha a taxa de produção de gás no ano  $t$  devido à DMR em um aterro sanitário durante um período de tempo entre  $T_i$  e  $T_f$  anterior a  $t$ . Seja  $M(t')$  a taxa de deposição de material no aterro sanitário no instante  $t'$  expressa em [t RSU/ano] e integrando entre  $T_i$ , o instante que inicia a deposição de resíduo, e  $T_f$  o instante que termina a deposição de RSU, obtemos.

$$r(t) = \int dr(t) = \int_{T_i}^{T_f} kL_0 \dot{M}(t') e^{-k(t-t')} dt' \quad (\text{mol/ano}) \quad (3.9)$$

O  $r(t)$  representa a taxa de produção total de metano no instante  $t$  obtida a partir da taxa de deposição de resíduo,  $M(t')$ . A Eq. 3.9, pode ser utilizada para se obter a taxa de produção de gás em duas situações diferentes que ocorrem frequentemente: a) a produção de gás durante o período de deposição e b) a produção de gás após ser encerrada a deposição no

aterro. Para exemplificar considera-se que taxa de deposição de resíduo no aterro seja constante e de valor,  $\dot{M}_0$  [t RSU/ano]. Para a situação (b) quando se deseja saber a taxa de produção de gás após o encerramento da deposição de material, isto é integrando a Eq. 3.9, para  $t > T_f$ , obtém-se:

$$r(t) = L_0 \dot{M}_0 \{e^{-k(t-T_f)} - e^{-k(t-T_i)}\} \quad \text{ou} \quad r(t) = L_0 \dot{M}_0 e^{-kt} \{e^{kT_f} - e^{kT_i}\} \quad (3.10)$$

### 3.4 Modelos matemáticos para a estimativa do potencial de geração de metano em aterros sanitário

Os modelos matemáticos consistem em um conjunto de equações que representam um sistema real e são ferramentas úteis e econômicas para avaliar o potencial de geração de gás em aterros.

Existem diversos modelos matemáticos que fornecem estimativas teóricas da geração de biogás em aterros sanitários. Segundo Audibert (2011) tais modelos podem ser classificados em relação à sua ordem que é determinada em função do tempo e outras variáveis. Assim pode-se dividir os modelos em quatro grandes grupos descritos abaixo:

- **Modelos de ordem zero:** a geração de biogás é constante ao longo do tempo;
- **Modelos de primeira ordem:** a geração de biogás apresenta variabilidade 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.

O grau de acuracidade dos modelos aumenta à medida que se aumenta o grau de variáveis necessárias para o seu funcionamento. Em estudos realizados na Holanda sobre os erros relativos à aplicação de modelos teóricos verificou-se que todos eles apresentaram erros de até 44%, atribuídos à variabilidade da composição física dos resíduos e a 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 AUDIBERT, 2011).



Mesmo os modelos multi-fase sendo os mais precisos, os modelos mais conhecidos e empregados em função da facilidade na obtenção de dados são os modelos primeira ordem recomendados pelas metodologias do Banco Mundial, da Agência de Proteção Ambiental Americana (USEPA) e do Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC).

Em tais metodologias observam-se similaridades dos parâmetros de entrada dos modelos: a massa de resíduos que ingressa ao aterro anualmente, o tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento, a taxa de geração de metano (k) e o potencial de geração de metano ( $L_0$ ). Dentre os fatores descritos, os parâmetros k e  $L_0$  são os majoritariamente definem as características do aterro estudado e o comportamento da curva de geração de metano no aterro.

A USEPA apresenta valores diferentes de k para aterros com diferentes graus de umidade e de acordo com o objetivo de sua utilização. Aterros com maior umidade favorecem as reações metanogênicas e possuem um valor de k maior. Aterros que recirculam o lixiviado para aumentar a umidade apresentam maior biodegradação e sugere-se o valor de  $0,7 \text{ anos}^{-1}$ . Para sistemas áridos, com precipitação pluviométrica anual inferior a 500 mm, sugere-se o valor de  $0,02 \text{ anos}^{-1}$  (SILVA, 2010). A Tabela 3 apresenta os parâmetros de k e L adotados por várias metodologias.

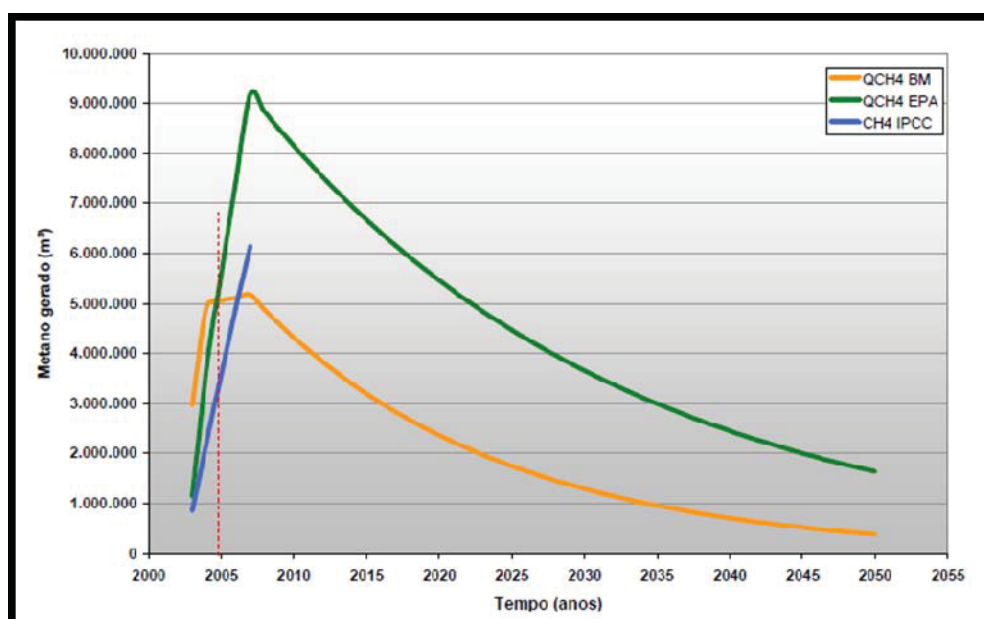
**Tabela 3:** Valores da constante de biodegradação (k) e do potencial de geração do biogás ( $L_0$ ) dado por diversas metodologias.

Referência	k ( $\text{ano}^{-1}$ )	L metano	
		(mol/t RSU)	Nm <sup>3</sup> /t RSU)
IPCC	0,05	4775	107*
Banco Mundial	0,06	7586	170
LandGEM (USEPA)			
Dimensionamento de emissões (valor maior)	0,05	7586	170
Dimensionamento realista			
Aterros convencionais	0,04	4463	100
Aterros áridos	0,02	4463	100
Aterros úmidos (recirculação de lixiviado)	0,70	4285	96

**Fonte:** Adaptada de Silva (2010).

Borba (2006), após a utilização das metodologias do IPCC, USEPA e Banco Mundial para o cálculo da geração de metano no aterro de Nova Iguaçu com parâmetros k e  $L_0$  sugeridos pela bibliografia conclui-se que a metodologia do IPCC é adequada para utilização em aterros ativos, pois ao aplicar sua fórmula a multiplicação pela fração exponencial

apresenta valores de emissão sempre crescente. Já a metodologia do Banco Mundial prevê as menores taxas de geração de biogás apresentando uma melhor representação para aterros já encerrados e a metodologia USEPA destaca-se por representar adequadamente a variação de geração de metano tanto para aterros ativos como para aterros já encerrados. A Figura 3.3 apresenta os gráficos de geração do metano em função do tempo para os três respectivos modelos.



**Figura 3:** Geração de metano em m<sup>3</sup> do aterro de Nova Iguaçu-RJ – metodologias do Banco Mundial (BM), USEPA (EPA) e IPCC, dispendo a vazão de metano em vazão de CH<sub>4</sub>.

**Fonte:** Borba (2006).

Já Mendes (2007) ao estudar valores de vazão de metano estimados de 4.700.000 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub>, 4.700.000 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> e 2.100.000 m<sup>3</sup> de CH<sub>4</sub> pelos métodos do Banco Mundial, IPCC e da USEPA respectivamente, concluiu que para aterros sanitários os métodos do BM e IPCC eram uma aproximação grosseira da realidade, pois generalizavam os locais de disposição e da taxa de coleta de resíduos implicando em erros nas estimativas de geração de gás. Já o método do USEPA apresentou-se como o mais próximo da situação real do aterro por considerar a cinética de geração de biogás ao longo do tempo de vida do aterro.

Audibert (2011) ao aplicar o modelo USEPA para estimativa de geração de gases do aterro de Londrina utilizando  $k=0,05$  e  $L_0=170$  estimou um volume de 34.665.202 Nm<sup>3</sup>/ano de biogás e 17.332.601 Nm<sup>3</sup>/ano de metano, enquanto na aferição de dados empíricos foi registrada uma média em relação às medidas de três campanhas para aferição de dados, os

valores de 34.398.731 Nm<sup>3</sup>/ano de biogás e 17.392.767 Nm<sup>3</sup>/ano de metano, indicando a validade da metodologia proposta.

Dessa forma, além de diversos autores indicarem a metodologia da USEPA como a mais condizente à realidade do aterro, sendo bastante empregada em diversos aterros do mundo, a adaptação da metodologia, realizada pela CETESB, por meio da criação de um programa de computador denominado “Biogás – Aterro 1.0” a tornou a metodologia mais utilizada no Brasil. Segundo Borba (2005), o modelo LandfillGasEmissionModel (LandGEM) criado pela USEPA com parte de sua metodologia ajustada ao Brasil é o modelo que melhor representa a variação de geração de metano tanto para aterros ativos como para aterros já encerrados.

### 3.4.1 Modelo LandGEM da USEPA

O LandfillGasEmissionsModel (LandGEM) é uma ferramenta de estimativa desenvolvida no Microsoft Excel, que pode ser utilizada para estimar as taxas totais de emissão dos gases metano, dióxido de carbono, compostos orgânicos voláteis, e poluentes particulados do ar gerados a partir da decomposição dos RSU dispostos nos aterros sanitários. O software apresenta uma abordagem relativamente simples e tem seu modelo baseado em dados empíricos dos aterros norte americanos. Dessa forma, quando houver disponibilidade de dados empíricos, os mesmos podem substituir fatores pré-determinados pelo programa a fim de obter-se maior exatidão no resultado final (EPA, 2005).

Já o modelo LandGEM é escrito em linguagem de programação Visual Basic, resultando no programa de computador intitulado “Biogás geração e uso energético – aterros”, desenvolvido pela parceria entre o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCT), a Secretaria de Estado do Meio Ambiente (SMA) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), com recursos do Programa Mudanças Climáticas Globais – “Plano Brasil de Todos” do Governo Federal (CETESB, 2006).

O programa Biogás – Aterro 1.0 utiliza para estimativa de produção de metano uma equação no qual a taxa de deposição de resíduos é variável. Assim resolvendo a eq. 3.9 para os intervalos de tempo iguais,  $\Delta t = t_n - t_{n-1}$ , e considerando que em cada intervalo, a taxa de deposição de RSU seja constante e igual a M, a taxa de produção de biogás tem-se:

$$r(t) = \int_{t_1}^{t_2} M(t') \cdot r(t', t) dt' = \sum_{n=0}^N \int_{t_{n-1}}^{t_n} M_n \cdot r(t', t) \cdot dt' \quad (3.11)$$

Denominando-se  $I_n$  a integral em cada intervalo de tempo e resolvendo a equação para os intervalos  $t_{n-1} < t < t_n$ , obtém-se a taxa de produção de metano em aterros sanitários no ano  $t$ , conforme é calculado no programa Biogás 1.0. Devido às deposições de resíduos em  $t'$  é necessário fazer um somatório das integrais,  $I_n$ .

$$R(t) = \sum_{n=0}^N I_n = \sum_{n=0}^N L_0 \dot{M}_n e^{-k(t-t_n)} (1 - e^{-k\Delta t}) \quad (3.12)$$

Sendo:

$R(t)$  = vazão de metano gerado no ano  $x$  pelo RSD depositado no ano  $T$  ( $m^3_{CH_4}/ano$ )

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

$\dot{M}_n$  = fluxo de resíduos no ano  $x$  ( $kgRSD$ );

$L_0$  = potencial de geração de metano ( $m^3_{biogás}/kgRSD$ );

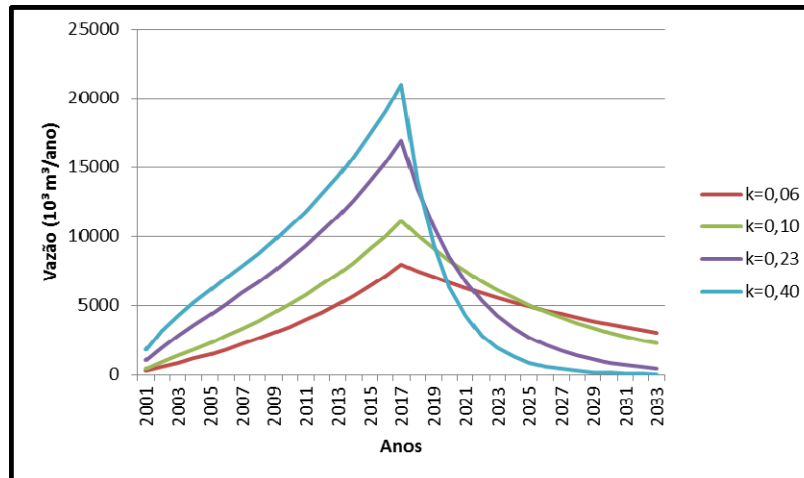
$t$  = ano de deposição do resíduo no aterro (ano) e  $t_n$  = ano atual (ano), conforme o intervalo  $t_{n-1} < t' < t_n$ ,  $t_0 = T_i$  e  $t_N = T_f$ .

A constante  $k$  determina a taxa de geração de metano da sua massa de resíduo aterrado. Assim quanto maior o valor de  $k$ , maior a geração de metano em um curto espaço de tempo. O valor de  $k$  é uma função de quatro principais fatores:

- ✓ O teor de umidade da massa de resíduos;
- ✓ Disponibilidade de nutrientes para os microrganismos que decompõem os resíduos que formam metano e dióxido de carbono;
- ✓ pH da massa de resíduos;
- ✓ Temperatura da massa de resíduos;

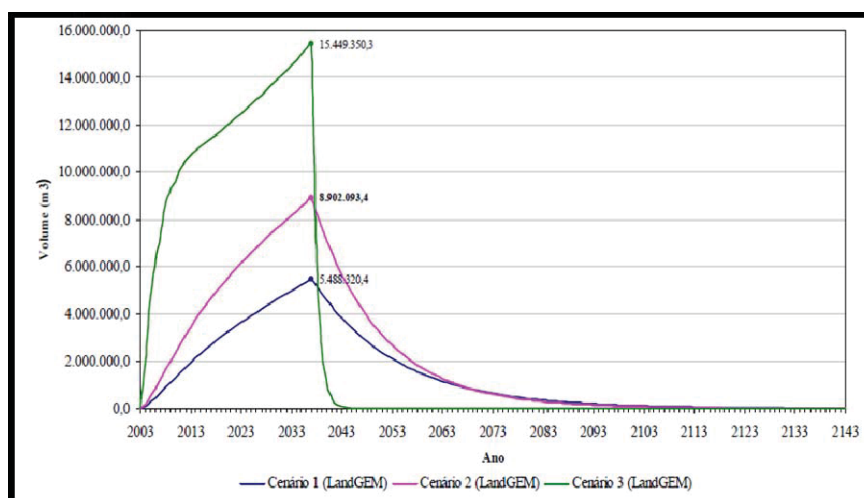
Já o  $L_0$  determina a capacidade potencial de geração do metano e depende apenas do tipo e da composição dos resíduos depositados no aterro. Segundo Oliveira et al. (2009), o parâmetro de avaliação mais importante, comum a todos os modelos, é a fração do resíduo presumida passível de decomposição.

No trabalho de Bello e Castro (2010) após a utilização do modelo LandGEM na projeção de cenários para a estimativa do potencial de geração de metano do aterro sanitário de Rio Claro concluiu-se que o aumento do valor da constante  $L_0$  e a manutenção do valor de  $k$  constante, implica no aumento do pico de geração de metano. Já para valores constantes de  $L_0$ , menores valores de  $k$  implicam em uma taxa menor de geração de metano por ano, porém por um período mais prolongado conforme apresentado na Figura 4.



**Figura 4:** Perfis da geração de gás para  $L_0 = 150 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{t}$ . RSD e diferentes valores de  $k$ .  
**Fonte:** Bello e Castro (2010).

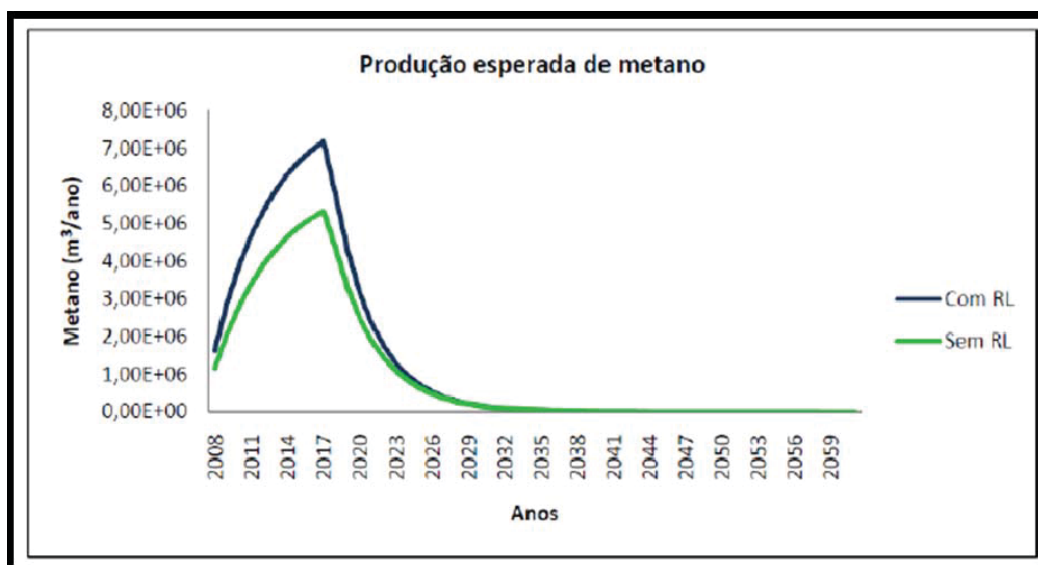
Oliveira et al. (2009) com a aplicação de três cenários para a estimativa da produção de biogás do programa LandGEM no aterro sanitário de Timbó – SC observou que os altos valores de  $L_0$  e  $k$  apresentam grandes vazões anuais de metano resultando em curvas com inclinações mais acentuadas, tanto durante a vida útil do aterro quanto após seu fechamento, e valores de  $L_0$  e  $k$  mais baixos, geram uma quantidade menor de metano, porém por um maior período de tempo. Na Figura 3.5 é possível averiguar a estimativa da geração de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC para os três cenários e observar que pelo modelo após o fechamento do aterro, quando o mesmo atingi sua capacidade máxima de deposição de resíduos, ocorre as maiores gerações de biogás e metano.



**Figura 5:** Estimativa da geração de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC para três cenários.  
**Fonte:** Oliveira et al (2009).

Faour (2006) estimou novos parâmetros de  $k$  e  $L_0$  para a metodologia da USEPA por meio da comparação estatística entre os resultados empíricos da produção de metano de um aterro com alta umidade e os resultados previstos pelo modelo LandGEM com os parâmetros de  $k$  e  $L_0$  propostos pela bibliografia. Tais valores foram propostos por meio da utilização de um modelo de regressão de efeito misto seguido de uma análise bootstrap. Sugerindo-se, com uma confiança de 95%, um conjunto conservador de parâmetros de  $k= 0,31\text{anos}^{-1}$  e  $L_0= 100\text{m}^3/\text{mg}$ , desde que o design seja otimizado e precedido de uma fase de latência média de 1,5 anos.

Matos (2008) comparou as estimativas de produção de biogás em um aterro com e sem recirculação, utilizando o modelo LandGEM com valores médios para parâmetros  $k$  e  $L_0$  observando após a geração dos gráficos no programa que a produção de biogás esperada com recirculação é cerca de 1,4 vezes superior ao caso tradicional. Na figura 6 é apresentado o gráfico com o volume total estimado de biogás de  $7,4 \times 10^7 \text{ m}^3$  para o caso de recirculação de lixiviado e para a sua ausência de  $5,5 \times 10^7 \text{ m}^3$ .



**Figura 6:** Produção estimada de metano com parâmetros médios observados com e sem recirculação.

**Fonte:** MATOS (2008).

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da área de estudo

O aterro sanitário municipal de Rio Claro com uma área de 141.637,68 m<sup>2</sup>, localiza-se à aproximadamente 8,0 km do centro da cidade de Rio Claro, às margens da Rodovia Fausto Santomauro (SP-127) que liga as cidades de Rio Claro e Piracicaba.

Situado no alto topográfico divisor das águas superficiais entre as bacias do Córrego da Servidão e Ribeirão Rio Claro, na bacia do Rio Corumbataí. Os solos da região são classificados como areno-argiloso e argilo-siltoso com permeabilidade natural da ordem de  $1,25 \times 10^{-5}$  a  $1,93 \times 10^{-7}$  cm/seg e o nível d'água na área do aterro variam entre 5,0 e 14,0 metros. (Relatório Ambiental Preliminar (RAP) do aterro sanitário de Rio Claro – SP).

Na área o clima predominante é o mesmo do município de Rio Claro, sendo composto por duas estações bem definidas. De abril a setembro se estabelece o período frio e seco com temperatura média de 17°C e precipitação entre 180 e 200 mm. O período quente e úmido prolonga-se de outubro a março com temperatura média de 22°C e precipitação média de 1200 mm (TROPMAIR, 1992).

O aterro sanitário permanece em operação diurna de segunda a sexta-feira, das 8h00 às 17h00 e, aos sábados, das 8h00 às 12h00, desde o ano de 2001. Recebendo resíduos sólidos domiciliares (classe II A) de praticamente 100% da área urbana do município, provenientes da coleta regular diária dos resíduos produzidos pelos 186.253 habitantes no município de Rio Claro (IBGE, 2010). A seguir na Figura 7 é apresentada uma ilustração do aterro sanitário.



**Figura 7:** Aterro sanitário municipal de Rio Claro – SP.

**Fonte:** Google Earth (2012).

O aterro conta com sistema de impermeabilização de base; sistemas de drenagem pluvial; de drenagem sub-superficial (percolado), de captação e de tratamento do lixiviado; e sistema de captação de gases. O sistema de tratamento é composto por uma lagoa anaeróbia, seguida de lagoa aerada (dois aeradores), lagoa facultativa/sedimentação e por último uma lagoa de maturação, que operam em regime fechado. O efluente tratado parte é recirculado no aterro e parte é transportada para tratamento em estação localizada no município de Jundiáí.

A recirculação ocorre diariamente, por meio de um caminhão tanque que capta o lixiviado excedente dos poços de acumulação ou das lagoas e lança na superfície do aterro, conforme apresentado na Figura 8.



**Figura 8:** Caminhão tanque realizando a recirculação do lixiviado na superfície do aterro e o solo encharcado logo após a prática.

No RAP, o aterro de Rio Claro foi projetado para ter uma vida útil de 16,2 anos (até o ano 2017), considerando uma média de disposição de 102 t./dia de resíduos, contudo segundo a Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento e Meio Ambiente do município de Rio Claro (SEPLADEMA) no ano de 2011 a média diária de disposição de resíduos foi de 180,21 ton/dia ocasionando na diminuição da sua vida útil.

Em relação à nota do IQR divulgada pela CETESB no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares a pontuação do aterro municipal de Rio Claro, que na sua abertura era de 9,6, vem regredindo desde 2009, atingindo o patamar de 8,0 em 2010 e 7,4 em 2011, ano no qual a classificação foi alterada de “adequada” para “controlada” (CORREIA, 2012).



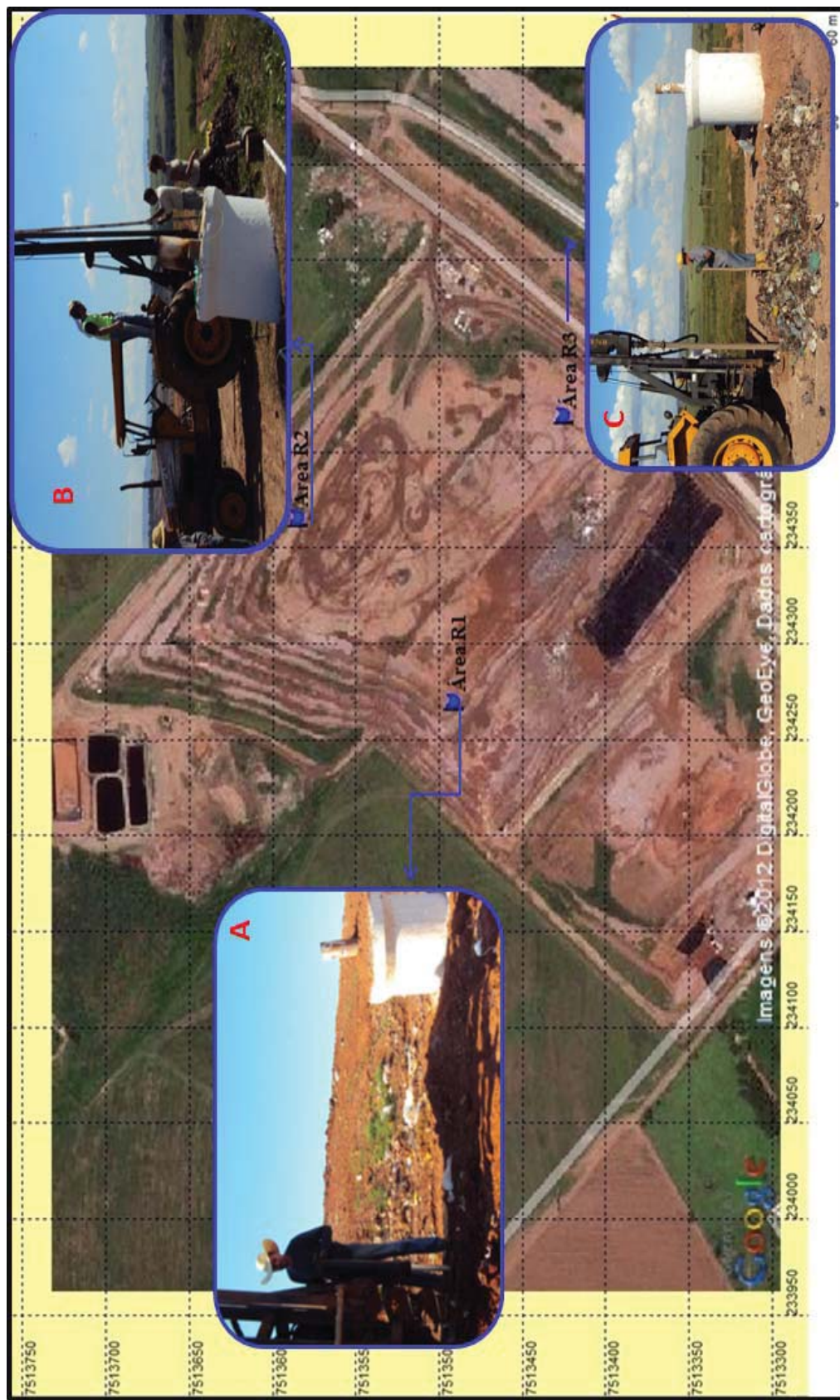
## 4.2 Coleta de amostras de resíduos aterrados

Para a seleção dos pontos de coleta das amostras dos resíduos aterrados levou-se em consideração aspectos como o tempo de disposição dos resíduos no aterro (idade do resíduo), a ocorrência ou não da prática de recirculação de lixiviado na área e os dados de vazão do metano e da temperatura dos gases nos drenos. Assim, foram definidos três locais para coleta de amostras dos resíduos aterrados, denominados “área R1” (22° 27' 52"S e 47° 34' 58"W), “área R2” (22° 27' 49"S e 47° 34' 55"W), “área R3” (22° 27' 54"S e 47° 34' 53"W), conforme a Figura 9.

- ✓ A “área R1” localizada próxima ao dreno 19 (Figura 9) possui resíduos com diferentes tempos de disposição, assim como o “ponto R3”, porém nessa área o tempo médio de disposição do resíduo é mais elevado, entre 4 e 6 anos. Na área não ocorre à recirculação de lixiviado.
- ✓ A “área R2” localizada próxima ao dreno 05 (Figura 9) é representada por resíduos mais antigos, com tempo de disposição entre 6 e 8 anos e possui elevada taxa de recirculação de lixiviado.
- ✓ A “área R3” localizada próxima ao dreno 28 (Figura 9) possui resíduos com diferentes tempos de disposição. Resíduos localizados em maiores profundidades classificados como mais “antigos”, e “resíduos novos”, com tempo de disposição de aproximadamente um ano na camada mais próxima da superfície. Na área ocorre a recirculação de lixiviado.

A coleta em cada ponto de amostragem foi realizada a cada 2 metros a partir da camada de cobertura do aterro até a profundidade de 7 m. Tal profundidade de perfuração foi determinada até 7 metros, pois houve uma grande dificuldade de perfuração do trado em profundidades elevadas, devido à presença de materiais grosseiros, como pedaços de madeira, sacos de juta, e de rochas utilizadas na base dos drenos.

O procedimento para coleta da amostra pautou-se no fato da disposição dos resíduos no aterro ocorrerem em camadas sobrepostas e, portanto esperava-se realizar a coleta de resíduos com idades distintas para cada profundidade. Contudo após a realização de todas as coletas foi averiguada uma grande similaridade na composição gravimétrica, temperatura e aspecto visual de algumas amostras e uma presença de elevada quantidade de solo, que estava envolvida superficialmente por uma camada de matéria orgânica. Dessa forma, foram selecionadas somente algumas das amostras coletadas para análise laboratorial.



**Figura 9:** Locais de coleta em relação à área do aterro; A -“área R1” próxima ao dreno 05; B-“área R2” próxima ao dreno 05; C- “área R3” próxima ao dreno 28;

No caso da amostragem dos resíduos aterrados foram realizados furos de oito polegadas de diâmetro com o auxílio de uma máquina de sondagem a trado mecanizada. Cada amostra tinha um peso de 1 a 2 kg. A seguir é descrito o procedimento para coleta do resíduo.

- a) Realização dos furos nos pontos definidos até a profundidade determinada para a amostragem. (Figura 10).



**Figura 10:** Perfuração da massa de resíduos para a coleta de amostras.

- b) Mediu-se a temperatura do resíduo com um termômetro digital tipo espeto em intervalos de um metro. (Figura 11).



**Figura 11:** Medição da temperatura dos resíduos aterrados em diversas profundidades, a foto A é caracterizada por um resíduo mais superficial "novo", a foto B um resíduo "intermediário" e na foto C um resíduo "antigo".

- c) Nas profundidades determinadas realizou-se a coleta dos resíduos aderidos à pá do trado, os quais em seguida eram armazenados em um saco plástico transparente, previamente identificado com o local de coleta, a temperatura e profundidade da amostra (Figura 12).



**Figura 12:** Amostra dos resíduos acondicionados.

A campanha de coleta originou três amostras na “área R1”, quatro na “área R2” e seis na “área R3”, totalizando treze amostras que foram levadas ao Laboratório de Saneamento Ambiental-SHS da Escola de Engenharia de São Carlos-USP, onde foram selecionadas as amostras que seriam realizadas a extração do solubilizado e posterior análise dos parâmetros.

A extração do solubilizado foi obtida seguindo as orientações NBR 10.006/2004, contudo em função da impossibilidade de filtrar a amostra com a membrana filtrante recomendada pela norma (0,1microns), mesmo a vácuo, foi utilizada no procedimento uma peneira grossa com filtro de papel grosseiro.

Para seleção dos parâmetros considerou-se os principais indicadores de qualidade dos resíduos aterrados, conforme apresentado na Tabela 4.

**Tabela 4:** Correlação e seleção dos parâmetros em função dos indicadores de qualidade.

Parâmetros selecionados	Indicadores de qualidade do lixiviado
SVT/ST	Análise da quantidade total de matéria orgânica
DBO/DQO	Biodegradabilidade da matéria orgânica
Namoniacal e Ntotal	Presença de possíveis inibidores e elementos que apresentem toxicidade aos processos biológicos

Para análise das amostras dos solubilizados foram realizadas de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater APHA, AWWA, WPCF (2005). Na tabela 5 são apresentados os parâmetros da parte sólida e do solubilizado provenientes do resíduo aterrado analisado e os métodos de análise.

**Tabela 5:** Parâmetros dos solubilizados e os métodos de análise.

Análise	Parâmetro	Método
Parte sólida	DQO	Digestão e espectrofotometria
	Sólidos (série completa)	Filtração e gravimetria
Solubilizado	DBO <sub>5, 20</sub>	Titulometria
	DQO	Digestão e espectrofotometria
	N amoniacal	Destilação e titulometria
	NTK	Digestão, destilação e titulometria.

#### 4.3 Práticas utilizadas para medição do gás metano no aterro

Os dados utilizados de vazão e concentração do metano foram obtidos do projeto de iniciação científica número 2011/20264-7 financiado pela FAPESP, "ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VAZÃO E DA CONCENTRAÇÃO DO METANO PRESENTE NOS GASES GERADOS NO ATERRO SANITÁRIO DE RIO CLARO – SP". Em tal projeto, os dados da vazão e concentração do metano foram obtidos através da seguinte metodologia:

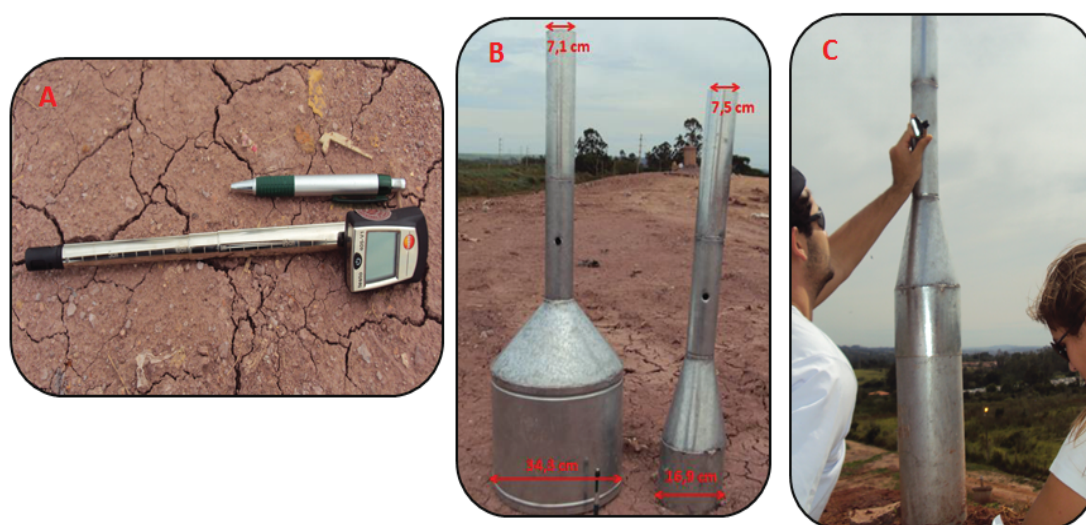
Inicialmente todos os drenos de gás foram identificados com auxílio de GPS. Com o programa GPS TrackMaker e uma imagem de satélite do Google Earth esses drenos foram georreferenciados, como mostrado na Figura 13 a seguir.



**Figura 13:** Imagem do aterro sanitário de Rio Claro - SP com a localização dos drenos de gás e com a nova área de disposição de resíduos destacada em amarelo.

A metodologia para seleção dos pontos de amostragem dos drenos de gás teve por princípio abranger todos os possíveis fatores que podem influenciar na composição e na vazão dos gases, como: 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.

A vazão do biogás foi obtida a partir da medição in situ da velocidade do biogás utilizando um termo anemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1, com precisão de 5% acoplado a um adaptador de chapa galvanizada, semelhante a uma “chaminé”, conforme foto A e B, Figura 14.



**Figura 14:** A – termo anemômetro digital portátil TESTO modelo 405-V1; B- “chaminés” confeccionadas no tamanho dos drenos existentes no aterro; C- Medição da velocidade do biogás no dreno.

Para o cálculo da vazão do biogás foi utilizada a equação apresentada a seguir.

$$Q = V.A \quad (4.1)$$

V - é velocidade do biogás, em m/s;

A - área da secção da chaminé, em m<sup>2</sup>;

Q - vazão, em m<sup>3</sup>/s.

Após a medição da vazão, a composição do biogás que apresenta as concentrações de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e O<sub>2</sub> foi realizada utilizando o Instrumento portátil LANDTEC GEM-2000 com precisão de 3%. Assim, multiplicou-se a Q dos gases pela concentração de CH<sub>4</sub> e obteve-se a vazão de CH<sub>4</sub> no aterro

sanitário de Rio Claro. Nas fotos A, B e C da Figura 15 é apresentado o procedimento de fechamento do dreno de gás para posterior medição.



**Figura 15:** A – Apagando o fogo dos drenos com panos molhados; B- selamento do dreno com plástico filme; C – Medição da concentração do biogás com o equipamento LANDTEC GEM-2000.

#### 4.4 Aplicação do Modelo LANDGEM

O modelo selecionado para a aplicação no presente projeto foi o LandGEM, desenvolvido pela USEPA. A seleção do modelo apresentado foi pautada na aplicação por meio do programa brasileiro Biogás – Aterro 1.0 e pela recomendação das agências do governo e órgãos ambientais do Brasil.

##### 4.4.1 *Análise do comportamento do modelo LandGEM para diferentes cenários com valores de $k$ e $L_0$ recomendados pela bibliografia*

Com a finalidade de avaliar a sensibilidade do modelo matemático, frente às variações dos parâmetros  $k$  e  $L_0$  foram projetados quatro diferentes cenários recomendados pela USEPA. O 01 considerando as melhores condições para produção de gás, os cenários 02 e 03 simulando condições intermediárias, e finalmente o cenário 04 simulando as condições mais desfavoráveis à produção de gás. Na tabela 6 é apresentada a descrição das características do aterro para cada um dos cenários estudados.

**Tabela 6:** Descrição dos cenários estudados e variação determinada da constante de biodegradação (k) e do potencial de geração de biogás (L<sub>0</sub>).

Cenários	Descrição das características do aterro para os cenários	Constantes	
		k (ano <sup>-1</sup> )	L(Nm <sup>3</sup> /RSU)
01	Massa de resíduo úmida, em função de clima chuvoso e/ou recirculação diária de lixiviado.	0,7	96
02	Massa de resíduo com umidade acima do convencional, em local com clima tropical.	0,05	170
03	Massa de resíduo com umidade convencional, em local com estações do ano bem definidas.	0,04	100
04	Massa de resíduo com baixa umidade, poucas chuvas e temperaturas mais elevadas ao longo de todo ano.	0,02	100

A utilização do modelo para criação de cenários requer, além dos parâmetros de entrada os valores de k e L<sub>0</sub>, os valores do fluxo de resíduos dispostos ao longo dos anos no aterro (M<sub>n</sub> em kgRSD), conforme apresentado na equação 3.10. Para essa estimativa foi utilizado o histórico de disposição de resíduos no aterro fornecido pela prefeitura municipal de Rio Claro, conforme apresentado na Tabela 7.

**Tabela 7:** Fluxo de disposição de resíduos no aterro municipal de Rio Claro de 2001 a 2012.

Ano	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
Quantidade de resíduos (Ton/ano)	17000	22000	26050	31900	36000	42120	45698	47128	49560	56264	67024	23438

Para o cálculo da geração de metano adotou-se o encerramento do aterro em 2012, pois como apresentado na figura 13 a área destacada em amarelo do aterro sanitário não possuía nenhum dreno instalado e não era utilizada para disposição de resíduo. Dessa forma, tal área não foi objeto do presente estudo, enquanto na área monitorada a disposição de resíduos foi encerrada em 2012.

As curvas obtidas pela simulação dos cenários foram comparadas com os dados de vazão de metano medidos no aterro, permitindo a inferência de qual cenário representa melhor as características do aterro estudado e a acuracidade do modelo em relação aos dados de campo. Para tal, foi realizada a comparação entre a tendência os dados do modelo no período de um ano e a tendência dos valores estimados de vazão de metano dos 29 drenos. A estimativa foi realizada a partir da fórmula abaixo:

$$\sum \frac{Q_{CH_4 \text{ dos drenos medidos}}}{\text{número de drenos medidos}} \times 29 = Q_{CH_4 \text{ do aterro no dia}} \quad (4.2)$$



#### 4.4.2 Ajuste dos parâmetros $k$ e $L_0$ do modelo LandGEM a partir dos dados de campo de geração de metano do aterro de Rio Claro

O estudo para estimativa de valores dos parâmetros  $k$  e  $L_0$ , foi realizado por meio da seleção de 5 valores para  $L_0$ , 96, 100, 120, 150 e 170; e para cada valor de  $L_0$  foi selecionado de maneira aleatória dez valores de  $k$ , entre 0,7 a 0,02, apresentado na tabela 8. A faixa de valores utilizada para escolha de  $L_0$  e  $k$  representa a diferença entre o valor máximo e mínimo recomendado pela bibliografia para cada parâmetro dos cenários 1 a 4.

**Tabela 8:** Seleção dos valores de  $k$  para simulação com os valores de  $L_0$  inferidos por meio de dados de campo dos resíduos aterrados do aterro.

<b>k 1</b>	<b>k 2</b>	<b>k 3</b>	<b>k 4</b>	<b>k 5</b>	<b>k 6</b>	<b>k 7</b>	<b>k 8</b>	<b>k 9</b>	<b>k 10</b>
0,7	0,58	0,45	0,3	0,15	0,09	0,08	0,06	0,04	0,02

Dessa forma, no programa computacional foram simulados 50 novos cenários, que foram comparados com os valores estimados de vazão de metano dos 29 drenos do aterro de Rio Claro.

A partir dessa interpretação final foi sugerido o melhor valor de  $L_0$  e a melhor faixa de valores de  $k$  para o estudo da geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro. Essa definição permitiu a simulação de novos cenários que representassem os valores empíricos e sua comparação com a curva do cenário recomendada pela bibliografia.

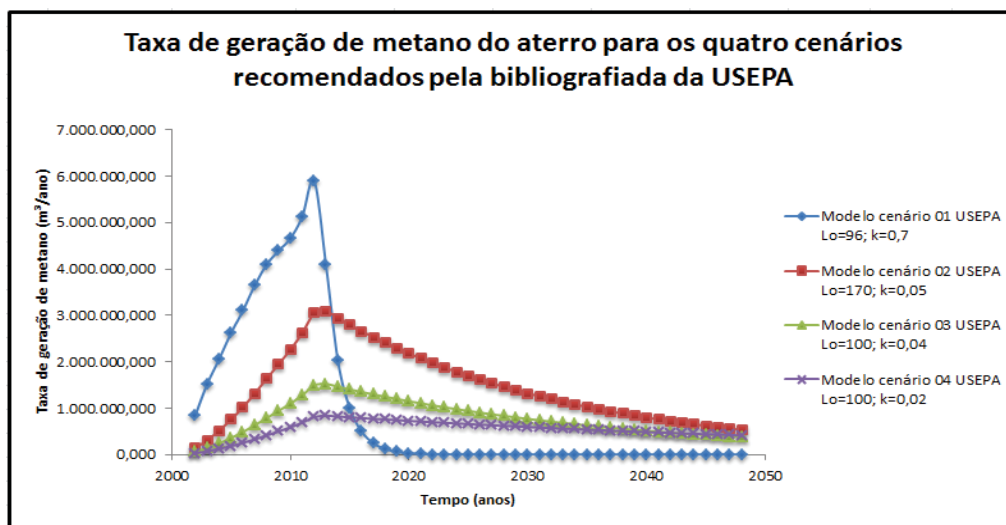
#### 4.4.3 Análise da consistência dos valores de $k$ e $L_0$ com os resultados das amostras dos resíduos aterrados

Os valores dos parâmetros obtidos na simulação dos 50 cenários foram baseados em manobras matemáticas e poderiam pertencer a uma faixa de valores não condizente com os valores encontrados na bibliografia para as características do resíduo aterrado. Assim, para analisar a consistência dos dados encontrados, o resultado do parâmetro  $k$  (taxa de geração de metano) foi comparado com a relação DDO/DQO obtidas nas amostras de resíduos aterrados, e a variável  $L_0$  foi comparada com a quantidade de matéria orgânica passível de biodegradação no resíduo aterrado, representada pela relação de SVT/ST.

## 5 RESULTADOS

### 5.1 Simulação do Modelo LandGEM para diferentes cenários

Na Figura 16 são apresentados os resultados das projeções de cenários com os valores recomendados pela literatura da USEPA.

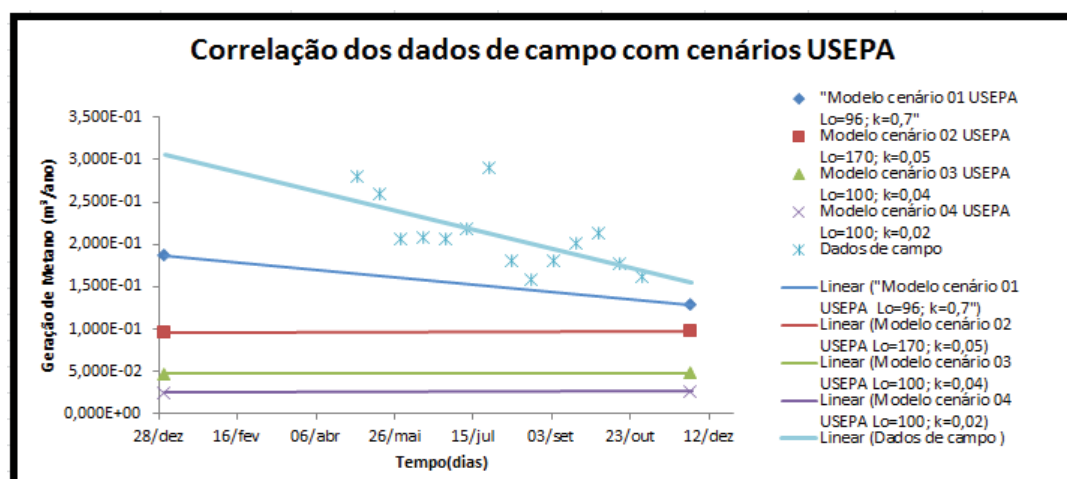


**Figura 16:** Projeção dos quatro cenários recomendados pela literatura da USEPA para estimativa da taxa de geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro.

Observa-se que o pico de geração de metano, em todos os cenários, coincide com o ano do encerramento da área do aterro considerada, 2012. Isso ocorre porque o modelo considera que no ano de encerramento da vida útil, a quantidade disposta de resíduos é máxima, acarretando em um maior potencial de geração ( $L_0$ ), desconsiderando que parte desta matéria orgânica não gera mais metano, pois está estabilizada. Com o fechamento é cessada a disposição de resíduos, o que explica o decaimento da geração de gás.

A partir da projeção dos quatro cenários, observa-se que o cenário 01 apresenta um “pico de geração” e, em seguida, um rápido decaimento da geração, quando comparado aos cenários 02, 03 e 04, respectivamente. Este comportamento pode ser explicado pelo elevado valor adotado para a variável “k”, o qual representa resíduos sólidos com elevada biodegradabilidade e, conseqüentemente, rápido consumo do substrato até sua exaustão. Situação contrária aos cenários 04, 01 e 02, nos quais a menor taxa de biodegradabilidade gera uma menor taxa de geração de gás e, conseqüentemente uma velocidade menor do consumo do substrato (matéria orgânica).

Comparando as características adotadas nos cenários com as encontradas no aterro sanitário de Rio Claro (elevada quantidade de matéria orgânica do resíduo aterrado e a prática diária de recirculação do lixiviado), o cenário que aparentemente melhor representaria a taxa de geração de metano é o cenário 01. A fim de averiguar esta hipótese, na figura 17, é apresentado o resultado da correlação entre os valores do modelo, e os valores de campo do aterro.



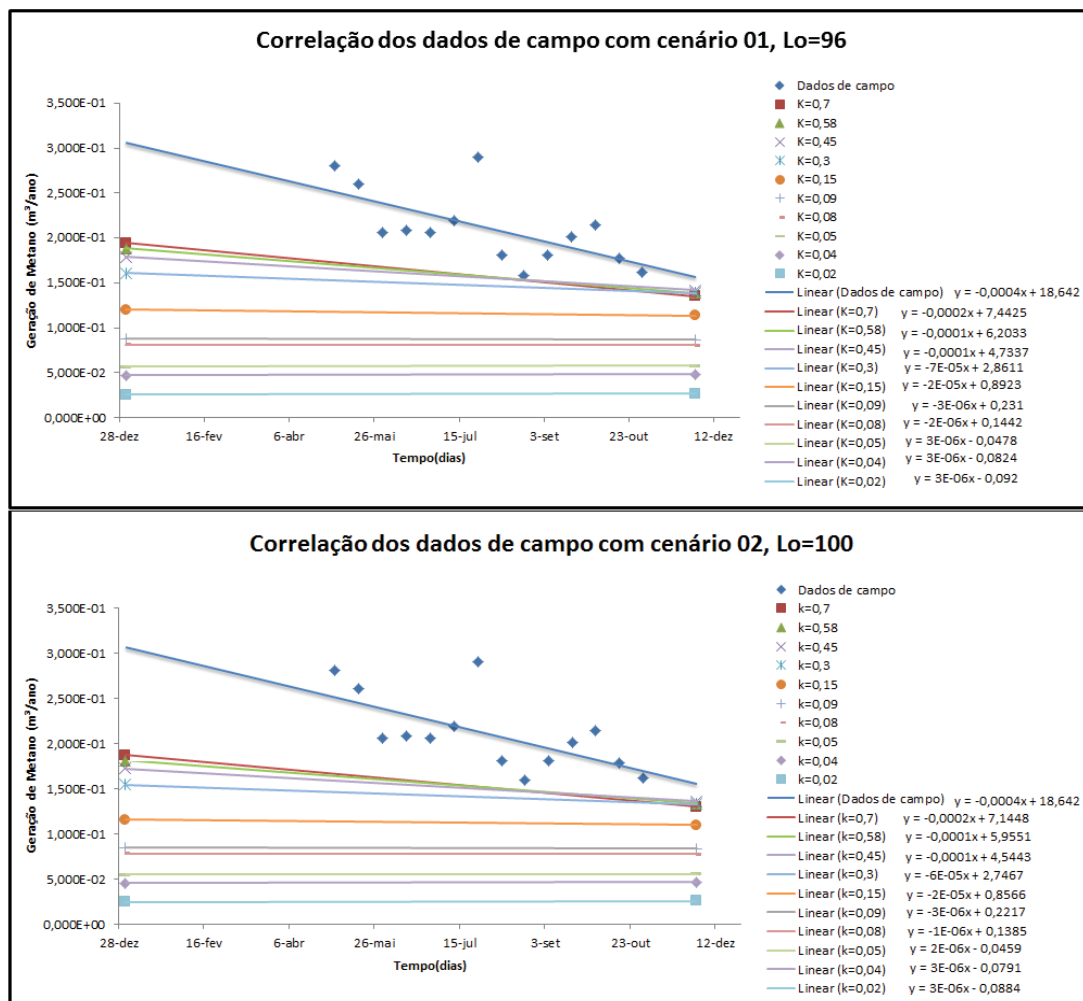
**Figura 17:** Correlação entre os valores do modelo e os dados de campo do aterro sanitário.

No gráfico, observa-se que os valores de campo estão em uma ordem de grandeza maior do que as apresentadas em todos os cenários, contudo o valor obtido de geração de metano pelo cenário 01 é o que melhor representa o valor de campo confirmando a afirmação anterior.

Dessa forma, no caso da falta de dados de campo para cálculo de geração de metano a partir dos resíduos dispostos, sugere-se que para aterros sanitários localizados em climas tropicais e com características de operação similar à descrita, os valores obtidos no cenário 01, mesmo subdimensionando o sistema, são os mais condizentes para o estudo.

## 5.2 Estimativa dos parâmetros $k$ e $L_0$ do modelo LandGEM a partir dos dados de campo de geração de metano do aterro de Rio Claro

Nas Figuras 18,19 e 20 são comparados os resultados de taxa de geração de metano dos 50 cenários obtidos por meio de simulações no programa Biogás 1.0 com os valores de geração de metano obtidos em campo no ano de 2012.

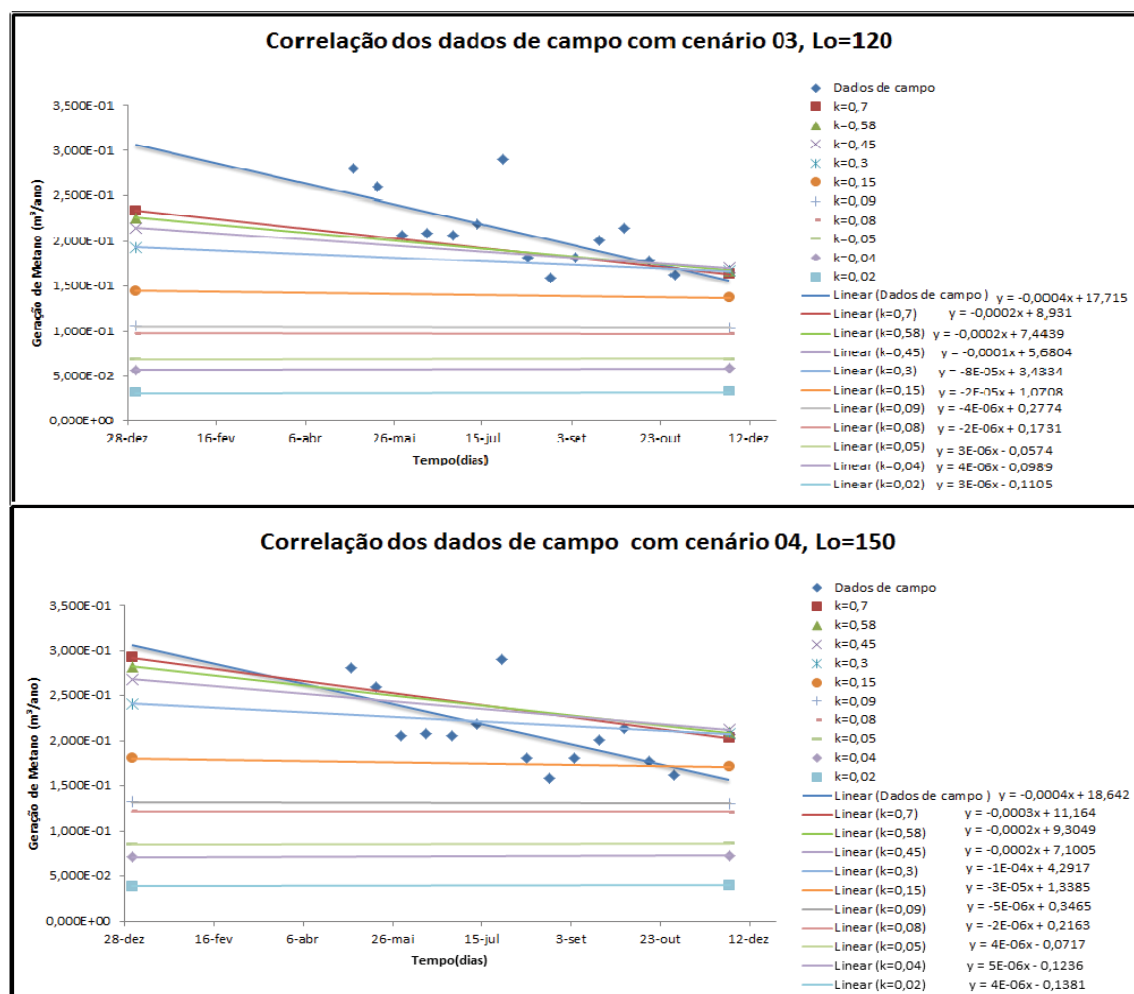


**Figura 18:** Resultados do modelo para os cenários 01( $L_0=96$ ) e 02( $L_0=100$ ) correlacionados com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro.

Na figura 18 observa-se que os valores obtidos nos gráficos pelo modelo estão subdimensionados em relação aos resultados de campo, sinalizando uma possível atividade biológica e conseqüente geração de metano superior à proposta pelo modelo. Tal fato é condizente com o cenário apresentado na revisão bibliográfica, pois os modelos e as sugestões de valores de  $k$  e  $L_0$  foram determinados para países desenvolvidos e de clima temperado, no qual a composição do resíduo e o clima local propiciam uma atividade biológica reduzida nos resíduos aterrados.

Vale ressaltar que ao longo dessas simulações foram abrangidos os parâmetros dos modelos indicados pela bibliografia, como no caso do  $L_0=96$  e  $k=0,7$ , valor mais próximo da reta dos dados de campo, e  $L_0=100$  e  $k=0,04$  e  $0,02$  com as duas menores taxas de geração do gráfico.

Na figura 18 também se observa que à medida que o valor de  $k$  varia entre 0,7 e 0,3 sua reta apresenta o comportamento semelhante ao encontrado na reta dos dados de campo, podendo sinalizar para a principal faixa de estudo de  $k$  para o aterro sanitário de Rio Claro. Tal afirmação é mais bem representada na análise do comportamento das retas do intervalo nos gráficos dos cenários 03 e 04 apresentados na figura 19 a seguir.



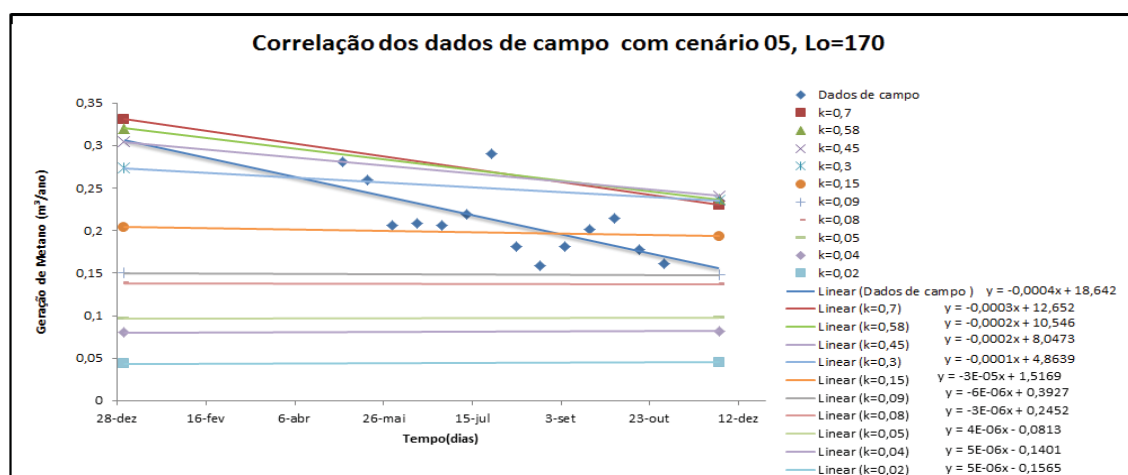
**Figura 19:** Resultados do modelo para os cenários 03( $L_0=120$ ) e 04( $L_0=150$ ) correlacionados com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro.

Com o aumento dos valores de  $L_0$  para 120 e 150 nos cenários 03 e 04, houve uma aproximação entre as retas dos dados de campo e do modelo, principalmente no cenário 04, no qual as retas se encontram na mesma ordem de grandeza. O parâmetro  $L_0$  que representa o potencial de geração de metano em peso de resíduo sólido domiciliar, e, portanto depende das características de biodegradabilidade do RSD aterrado. Assim, a melhoria na correlação das

retas com o aumento de  $L_0$  pode ser representada por uma elevada percentagem resíduo orgânico suscetível à biodegradação no resíduo aterrado.

Tratando-se do valor de  $k$ , como descrito anteriormente, para todos os cenários apresentados os resultados de retas com valores de  $k$  entre 0,7 e 0,3 são os que mais bem representam o comportamento dos dados de campo. No caso, avaliando os valores dos cenários 03 e 04, o valor de  $k$  que em ambos aparentemente melhor representa o comportamento da reta para geração de metano é 0,7. Contudo analisando a geração total de metano do modelo e dos dados de campo, adotar  $k$  até 0,3 ainda é condizente com o comportamento da curva.

Na figura 20 a seguir é apresentado o cenário 05 para  $L_0=170$ .



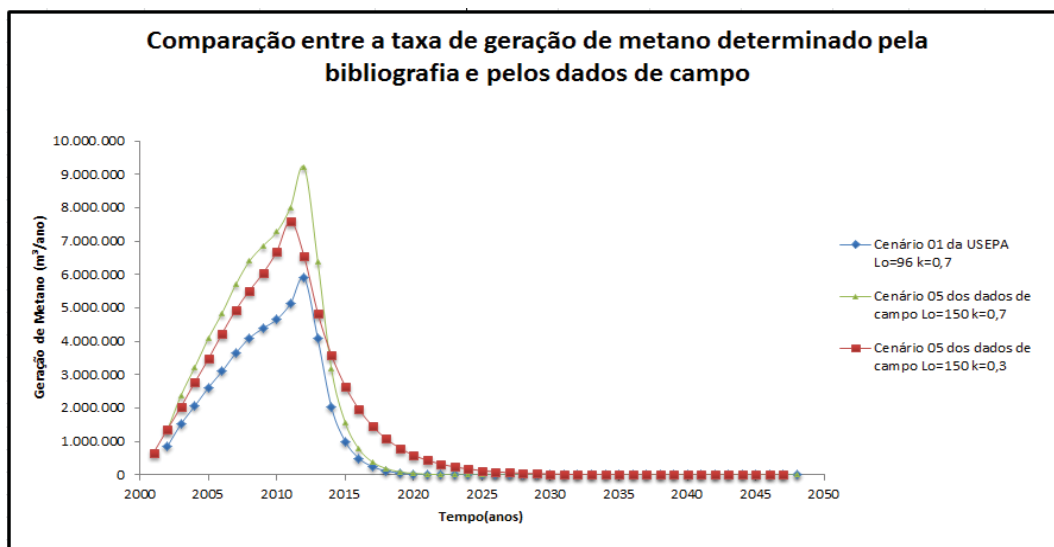
**Figura 20:** Resultados do modelo para o cenário 05 ( $L_0=170$ ) correlacionado com os dados de campo do ano de 2012 do aterro sanitário de Rio Claro.

No gráfico apresentado, com o contínuo aumento do parâmetro  $L_0$  observa-se o superdimensionamento da geração de metano no intervalo de  $k=0,7$  à  $k=0,3$ . Nesse cenário, assim como no 01 e 02, o modelo também é simulado com os parâmetros indicados pela bibliografia,  $L_0=170$  e  $k=0,05$  e a reta encontra-se em uma ordem de grandeza bastante inferior à requisitada pelos dados reais. Sendo mais uma vez comprovado que o cenário 02 da USEPA apresenta parâmetros que não são corretos para estudos de aterro com características de clima tropical e com práticas de recirculação diária na área do aterro.

Dessa forma, conclui-se que os cenários 1, 2,3 subdimensionam a geração de metano no aterro sanitário de Rio Claro e o cenário 5 superdimensionada essa vazão. Assim, o valor de  $L_0$  que melhor se enquadra à geração de metano em relação aos dados de campo do aterro

de Rio Claro é 150, enquanto no estudo do k o comportamento da reta que melhor representa à realidade em todos os cenários são os valores entre 0,7 e 0,3.

Na figura 21, são apresentados os dois principais cenários indicados pelos dados de campo em comparação com o cenário 01 da USEPA, recomendado para as características do aterro de Rio Claro.



**Figura 21:** Comparação entre a taxa de geração de metano dos cenários determinados pelos dados de campo e pela bibliografia.

Observa-se que o “pico de geração” do metano nos cenários indicados é maior que o do cenário recomendado pela bibliografia, o fato pode ser explicado pelos altos valores de k e  $L_0$  selecionados.

No caso do cenário 01 da USEPA com  $L_0 = 96$  e  $k=0,7$  comparado com o cenário 04 dos dados de campo  $L_0 = 150$  e  $k=0,7$  pode-se concluir que o aumento do valor de  $L_0$ , para um mesmo valor de k, implicou no aumento do pico de geração de metano e consequentemente na quantidade de metano gerada ao longo dos anos. Assim, conclui-se que o pico de geração de metano é diretamente proporcional à quantidade de matéria orgânica presente nos resíduos, e seu aumento representa uma maior quantidade de material para ser degradada. No caso do Brasil os valores apresentados são bastante condizentes, em função da alta porcentagem de matéria orgânica, mais de 50%, presente nos resíduos sólidos domiciliares.

Já para o cenário 04 dos dados de campo  $L_0 = 150$  e  $k=0,3$ , além do aumento do pico de geração e da quantidade de metano gerada em relação ao cenário 01, em função da redução no valor de k a taxa de geração de metano por ano diminuiu, e o período de geração foi

prolongado. Esse fato pode ser justificado porque o parâmetro  $k$  representa a taxa de degradação da matéria orgânica, assim um valor reduzido significa que a matéria orgânica será mais lentamente degradada, ocasionado em menores picos e curvas de decaimento suaves após o fechamento da área do aterro estudada. Esse fenômeno é observado, se comparado às curvas do cenário 04 dos dados de campo  $L_0 = 150$  e  $k=0,3$  com  $L_0 = 150$  e  $k=0,7$ .

### 5.3 Análise da consistência dos valores de $k$ e $L_0$ obtidos com os índices de biodegradabilidade do resíduo aterrado

Na tabela 9 são apresentados os resultados obtidos nas análises de laboratório das amostras de resíduos coletadas no aterro sanitário de Rio Claro.

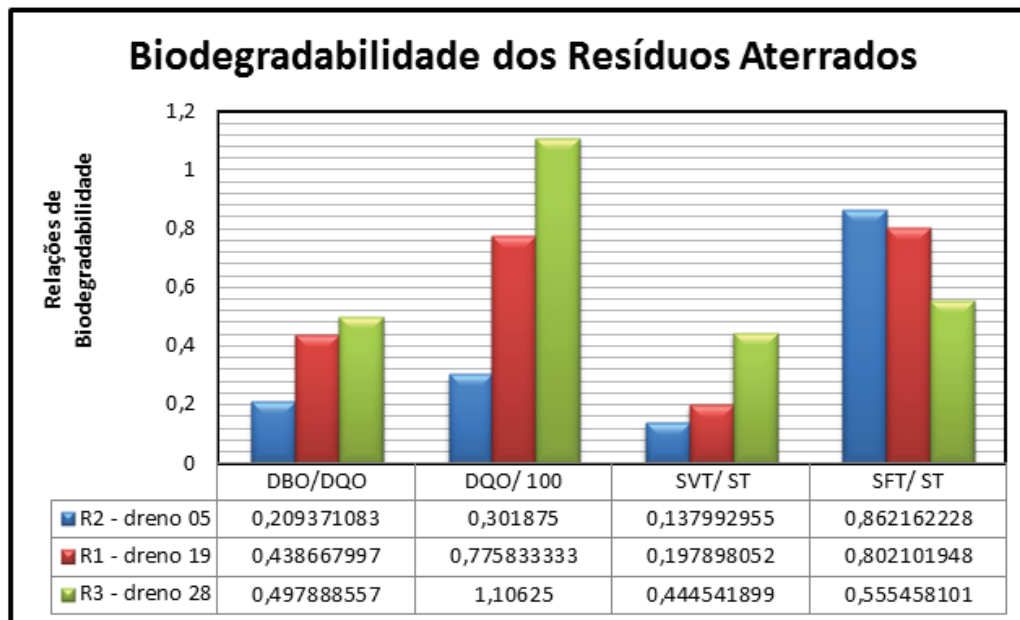
**Tabela 9:** Resultados das análises de laboratório do resíduo aterrado e os índices de biodegradabilidade dos resíduos.

<b>Dados de Laboratório</b>										
Parâmetros de análise dos resíduos aterrados		R1 - dreno 19			R2 - dreno 05				R3 - dreno 28	
		R1.1	R1.2	R1.3	R2.1	R2.2	R2.3	R2.4	R3.3	R3.4
DBO	(mg O <sub>2</sub> L)	981	7263	129	154	186	53	17	1763	1243
DQO	(mg O <sub>2</sub> L)	2136	14140	376	435	526	728	298	3430	2580
Relação de DBO/DQO		0,459	0,514	0,343	0,354	0,354	0,073	0,057	0,514	0,482
Média da relação DBO/DQO		0,438667997			0,209371083				0,497888557	
Nitrogênio amoniacal	(mg N L <sup>-1</sup> )	49	214	42	92	43	151	107	63	106
Nitrogênio total kjeldhal	(mg N L <sup>-1</sup> )	76	392	73	119	62	196	122	95	164
Relação de N/NTK		0,645	0,546	0,575	0,773	0,694	0,77	0,877	0,6632	0,646
Média da relação N/NTK		0,588665892			0,778528744				0,654749679	
DQO	(g O <sub>2</sub> Kg <sup>-1</sup> )	45,5	159,3	28	37,25	24,5	40,5	18,5	71,75	149,5
Média da DQO		77,58333333			30,1875				110,625	
Sólidos totais	(g)	26,97	22,93	52,42	16,11	62,07	64,12	52,12	56,39	20,33
Sólidos totais fixos	(g)	24,76	14,52	44,82	12,02	58,97	59,05	43,34	33,77	10,41
Relação de SFT/ST		0,918	0,633	0,855	0,746	0,95	0,921	0,832	0,5989	0,512
Média da relação SFT/ST		0,802101948			0,862162228				0,555458101	
Sólidos totais voláteis	(g)	2,21	8,41	7,6	4,1	3,1	5,07	8,78	22,62	9,92
Relação de SVT/ST		0,082	0,367	0,145	0,255	0,05	0,079	0,168	0,4011	0,488
Média da relação SVT/ST		0,197898052			0,137992955				0,444541899	
Porcentagem de umidade	%	27,32	37,72	27,16	42,09	17,37	27,95	34,67	35,87	53,9
Média da umidade		30,73333333			30,52				44,885	
Temperatura	°C	34,9	35,4	37,5	34,9	36,4	36,7	38,8	41,5	43,9
Média da temperatura		35,93333333			36,7				42,7	

Para facilitar o estudo e a comparação dos dados entre os pontos de coleta R1, R2 e R3 foi realizada uma média entre os resultados dos parâmetros obtidos nas amostras de um mesmo ponto. A metodologia também foi utilizada para cálculo dos índices de biodegradabilidade do



resíduo aterrado, dessa forma cada ponto é representado por um único índice de biodegradabilidade, conforme a Figura 22 a seguir.



**Figura 22:** Índices de DBO/DQO, DQO/100, SVT/ST e SFT/ST obtidos nas análises das amostras dos resíduos aterrados do aterro sanitário de Rio Claro.

No gráfico, observa-se que a DQO/100 e os índices de biodegradabilidade DBO/DQO e SVT/ST aumentam do ponto de coleta R2, para R1 e R3, respectivamente. Indicando um consequente aumento na disponibilidade de matéria orgânica passível de biodegradação no resíduo aterrado e comprovando que tais resíduos possuem características condizentes com as propostas na metodologia para caracterização dos resíduos de cada ponto de coleta. Sendo assim, o ponto R2 possui um resíduo com maior tempo de disposição e pouca disponibilidade de matéria orgânica, o ponto R1 tem um resíduo de biodegradabilidade e tempo de disposição intermediário e no R3 existe um resíduo mais recente, com pequeno tempo de disposição no aterro.

Para a análise da consistência dos valores de  $k$  e  $L_0$  obtidos a partir dos dados de campo com os índices de biodegradabilidade do resíduo aterrado, foram calculadas novas médias para os índices DBO/DQO e SVT/ST transformando-os em um único valor.

No caso do índice de DBO/DQO o resultado obtido foi 0,4, valor que segundo a bibliografia caracteriza resíduos com um nível de degradação biológica intermediária. Já o intervalo de 0,7 a 0,3, inferido a partir dos dados de campo, para o parâmetro  $k$  indica de um nível de degradação biológica do resíduo entre baixo e intermediário. Assim na correlação do

índice com o parâmetro pode-se concluir que o valor de  $k$  mais coerente com biodegradabilidade do resíduo aterrado para a simulação do cenário de dados de campo seria o 0,3.

Já no caso do índice de SVT/ST o resultado obtido foi 0,29, valor que segundo a bibliografia caracteriza uma quantidade baixo-intermediária de matéria orgânica passível de biodegradação, representada pelos sólidos voláteis, com capacidade de biodegradação em relação à concentração de sólidos fixos. O valor 150 recomendado para  $L_0$  indica uma disponibilidade intermediário-alta da quantidade de matéria orgânica passível de biodegradação. Assim na correlação do índice com o parâmetro pode-se concluir que o valor de  $L_0$  recomendado pode ainda não ser a melhor escolha para a simulação do modelo, mesmo estando bastante próximo do esperado pela biodegradabilidade do resíduo, um novo valor entre 120 e 150 pode ser ainda mais apropriado para o estudo.

## 6 CONCLUSÕES

A partir do estudo realizado conclui-se:

- ✓ No caso do aterro sanitário municipal de Rio Claro, o cenário 01 é o que melhor representaria a taxa de produção de metano, em função das características físicas do aterro de Rio Claro.
- ✓ No ajuste dos parâmetros em relação aos dados de campo o valor de  $L_0$  que melhor se enquadra à geração de metano do aterro sanitário de Rio Claro é 150, enquanto no estudo do  $k$  o comportamento da reta que melhor representa à realidade são os valores entre 0,7 e 0,3.
- ✓ Em função dos valores de  $k$  e  $L_0$  selecionados para projeção dos indicados pelos dados de campo o “pico de geração” do metano ficou maior que o do cenário recomendado pela bibliografia.
- ✓ Na correlação do índice de biodegradabilidade DBO/DQO com o parâmetro  $k$ , mesmo os dados do modelo indicando valores entre 0,7 e 0,3, o valor de  $k$  mais coerente com o nível de degradação biológica intermediária do resíduo aterrado seria o 0,3.
- ✓ Na correlação do índice SVT/ST com o parâmetro  $L_0$ , o valor de 150 recomendado pode ainda não ser a melhor escolha para a simulação do modelo, pois indica uma disponibilidade intermediário-alta da quantidade de matéria orgânica passível de biodegradação enquanto o resíduo aterrado já está em um patamar de disponibilidade baixo-intermediária. Sugerindo-se que em função da biodegradabilidade do resíduo, um novo valor entre 120 e 150 pode ser ainda mais apropriado para o estudo.

## 7 RECOMENDAÇÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

Recomenda-se que para estudos futuros sejam realizadas medições empíricas da geração de gás metano desde o início da disposição dos resíduos sólidos no aterro até a uma diminuição significativa da geração de gás metano após o fim da vida útil do aterro. E que ao longo do estudo seja dada maior atenção ao comportamento da geração do metano ao longo da fase metanogênica, pois segundo a bibliografia, nesta fase que é gerada a maioria do metano passível de reaproveitamento energético.

Também se recomenda que seja realizado um número ainda maior de simulações que abordem a variação dos valores para  $L_0$  e que sejam realizados estudos com modelos mais complexos, com equações de segunda ordem ou multi-fase.

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 dessa prática na seleção de valores para  $L_0$  e  $k$ .

Por fim, já que mesmo com a adesão de todos os municípios as diretrizes da PNRS e o fim da disposição da matéria orgânica em aterros sanitários, sugere-se um estudo da viabilidade de aplicação do presente modelo para estimativa de geração de metano em reatores anaeróbicos.

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AUDIBERT, J.L. **Avaliação qualitativa e Quantitativa do biogás do aterro controlado de Londrina. Dissertação** (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) - Universidade Estadual de Londrina, Paraná, 2011.
- BELLO, P.P.G. CASTRO, M. C. A. A. **Estudo da variação da porcentagem e da estimativa de geração de gás metano para o aterro sanitário do município de Rio Claro - SP. Iniciação Científica** – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2010.
- BORBA, S.M.P. **Análise de modelos de geração de gases em aterros sanitários: estudo de caso. Dissertação** (Pós-Graduação de Engenharia) - Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- BRASIL. Lei n 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. Disponível em <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm)>. Acesso em: 03 set. 2012. . . .
- BRITO FILHO, L. F. **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos. Dissertação** (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, Rio de Janeiro, 2005.
- CASTILHOS JR., A.B.; MEDEIROS, P.A.; FIRTA, I.N.; LUPATINI, G.; SILVA, J.D. **Principais processos de degradação de resíduos sólidos urbanos. Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**, 294p, 2003.
- CETESB. **Manual do usuário do programa de computador Biogás: geração e uso energético – aterros – versão 1.0**. 65 p, 2006.
- CETESB. **Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Domiciliares. Secretaria do Meio Ambiente/Governo do Estado de São Paulo**. 186 p, 2010.
- CONTRERA, R.C. **Tratamento de lixiviados de aterros sanitários em sistema de reatores anaeróbio e aeróbio operados em batelada sequencial. Dissertação** (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 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/>>.
- EPA – Environmental Protection Agency. **Landfill Gas Emissions Model (Land GEM)**

**Version 3.02 User's Guide.** 56 p, 2005.

- FAOUR, A.A. REINHART, D.R. YOU, H. **First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills.** Waste Management vol. 27, p. 946–953, 2007.
- FIORE, F.A. **Avaliação de um Sistema Integrado de Tratamento de Resíduos Sólidos e de Chorume, com Ênfase na Fase Metanogênica.** Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais (EE/UFGM), Belo Horizonte, 2004.
- 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.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. **Atlas de saneamento.** 151 p. (Coordenação de Geografia). Rio de Janeiro: 2004. Disponível em: <[http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas\\_saneamento/pdfs/mappag59.pdf](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/atlas_saneamento/pdfs/mappag59.pdf)>. Acesso em: 18 jan. 2011.
- MATOS, A.R.V. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos.** Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Portugal, 2008.
- MENDES, L.G.M. SOBRINHO, P.M. Comparação entre métodos de estimativa de geração de biogás em aterro sanitário. Revista Biociências. 134p. vol. 13, 2007.
- MORAIS, J.L. **Estudo da potencialidade de processos oxidativos avançados, isolados e integrados com processos biológicos tradicionais, para tratamento de chorume de aterro sanitários.** Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Química) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.
- OLIVEIRA, D. M.; SANTANGELO, V. S.; DIAS, V. C. F.; CASTILHOS Jr.; A. B. **Estimativa da produção de biogás no aterro sanitário de Timbó/SC.** In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 25. 2009, Recife/PE. Anais. ABES, 2009.
- PIEROBON, L. R. P.; **Sistema de geração de energia de baixo custo utilizando biogás proveniente de aterro sanitário.** Dissertação (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- 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.
- RELATÓRIO AMBIENTAL PRELIMINAR – RAP. **Aterro sanitário e industrial do município de Rio Claro – SP.** Ação engenharia. São Paulo – SP.

- ROZZI, A. REMIGI, E. **Methods of assessing microbial activity and inhibition under anaerobic conditions: a literature review.** Reviews in Environmental Science and Technology, v.3, p.93-115. 2004.
- SCHALCH, V. **Produção e características do chorume em processo de decomposição de lixo urbano. Dissertação** (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1984.
- SILVA, E.R. **Modelagem matemática da produção e transporte de biogás em aterros sanitários. Dissertação** (Mestrado em Energia na Área de Tecnologia, Engenharia e Modelagem – Aterros Sanitários). - Universidade Federal do ABC, Santo André-SP, 2010.
- TCHOBANOGLOUS, 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

## FICHA DE AVALIAÇÃO DE MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA

### - CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL -

Estudante: Natasha Pereira Marques

Matrícula Unesp nº: 208000814



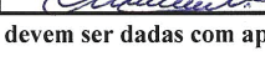
Título do Trabalho: "UTILIZAÇÃO DE PARÂMETROS QUALITATIVOS DOS RESÍDUOS ATERRADOS COMO REFERÊNCIA NO PROCESSO DE SELEÇÃO DE VALORES EMPREGADOS EM MODELOS MATEMÁTICOS PARA A ESTIMATIVA DE GERAÇÃO DE METANO"

Data da Defesa: 21/11/2011

Horário: 09:30 horas

Local: AV. Vinte e Quatro A, 1515 - Bela Vista, Rio Claro no Anfiteatro do CEA- Centro de Estudos

#### Avaliação:

MEMBROS DA BANCA	ASSINATURA	INSTITUIÇÃO	NOTA
Nelson Callegari Júnior		Unesp-Rio Claro	10,0
Marcus Avezum de Castro		Unesp-Rio Claro	10,0
Valdir Schalch		USP- São Carlos	10,0
Observação: As notas e a média final devem ser dadas com apenas uma casa decimal		Média Final:	10,0

A banca considera necessária a elaboração de um exemplar corrigido da monografia?

Sim

Não

Se sim, indique no espaço abaixo as principais correções a serem realizadas.

A banca sugere a publicação digital da versão final do trabalho?

Sim

Não

Rio Claro, 21/11/2012

  
\_\_\_\_\_  
Presidente da Banca Examinadora  
(orientador)