

RISCOS AMBIENTAIS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS  
COM ÊNFASE NA EMISSÃO DE GASES

José Luiz Gerlach Real

TESE SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÃO DOS PROGRAMAS DE PÓS-GRADUAÇÃO DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL.

Aprovada por:



---

Prof. Cláudio Fernando Mahler, D.Sc.



---

Profa. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.



---

Profa. Helena Ribeiro, D.Sc.



---

Prof. Marcelo Martins Werneck, Ph.D.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL

MAIO DE 2005

REAL, JOSÉ LUIZ GERLACH

Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases [Rio de Janeiro] 2005

X, 173 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2005)

Tese – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Aterro de Resíduos Sólidos
2. Biogás
2. Saúde Ambiental
3. Estudo Epidemiológico
4. Avaliação de Risco Ambiental
6. Lixões

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

### ***Além do porto***

*Um eremita do mosteiro de Sceta se aproximou do Abade Teodoro: “Sei exatamente qual o objetivo da vida. Sei o que Deus pede ao homem e conheço a melhor maneira de servi-lo. E, mesmo assim, sou incapaz de fazer aquilo tudo que devia estar fazendo para servir ao Senhor.”*

*“Você sabe que existe uma cidade do outro lado do oceano”, respondeu Teodoro. “Mas ainda não encontrou o navio, não colocou sua bagagem a bordo e não cruzou o mar. Por que ficar comentando como ela é, e como devemos caminhar por suas ruas? Coloque em prática o que você está dizendo e o caminho se mostrará por si mesmo.”*

(Coelho P., 2005)

À minha esposa Márcia  
e aos meus filhos  
Rodrigo e Rafael

## AGRADECIMENTOS

Os meus agradecimentos especiais vão para todos os professores do Programa de Engenharia Civil da COPPE com os quais tive o prazer de conviver e de receber seus ensinamentos. Principalmente no que se refere à paciência, compreensão e tolerância demonstrados para com os alunos de pós-graduação como nós que, oriundos de diversas áreas técnicas necessitavam uma atenção maior para captar aqueles ensinamentos e transformá-los em ferramentas para uma utilização maior. Essa paciência, dedicação e profissionalismo demonstrados por todos os professores sempre me motivaram e incentivaram nos momentos mais difíceis dessa convivência acadêmica.

Esperando não cometer injustiças por falta de lembrança deixo meus agradecimentos a algumas pessoas especiais que tornaram possível essa conclusão:

À minha esposa Márcia que, com sabedoria, amor e muita paciência, apesar da necessidade de dedicação no desenvolvimento de suas próprias teses, soube reservar atenção suficiente para manter acesa a minha vontade de concluir esse trabalho;

Aos meus filhos Rodrigo e Rafael que souberam compreender e suportar as particularidades de um pai “em estado de tese”.

Ao meu orientador professor Cláudio Fernando Mahler pelo apoio sempre presente, pelo seu incentivo e pela sua amizade.

Ao professor Gil Silva que com seus ensinamentos de estatística e muita paciência permitiu a obtenção das conclusões relativas ao estudo epidemiológico. Da mesma forma ao Bruno lespa pela colaboração nas pesquisas em Paracambi.

A todos os colegas da Geotecnia, que sempre tiveram palavras de incentivo e contribuíram efetivamente para a continuação do meu trabalho. Em especial a Adriana Schueler, Júlio César Andrade, Ana Maria Silveira e Luis Fernandes, entre outros.

Aos amigos Elaine, José Reynaldo, Eudes, Ricardo, Sérgio, Marco Antônio, Joacir, Edson e Adriana que, de uma forma ou de outra, sempre estiveram me acompanhando e apoiando durante esse caminho.

Aos amigos José, Nina e Guilherme Aragão pela sua ajuda, compreensão e colaboração nas intermináveis sessões de computador em Teresópolis.

A todo o pessoal da Prefeitura de Paracambi que contribuiu para a execução dos trabalhos.

Aos amigos Bety e Jairo da Secretaria do PEC por sua atenção e amizade durante esses anos.

Aos professores Maria Cláudia Barbosa, Helena Ribeiro e Marcelo Werneck, pela participação na banca e pelos ensinamentos.

Resumo da Tese apresentada à COPPE/UFRJ como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

## RISCOS AMBIENTAIS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS COM ÊNFASE NA EMISSÃO DE GASES

José Luiz Gerlach Real

Maio/2005

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil

O tratamento e disposição dos resíduos sólidos urbanos – RSU, é uma contínua preocupação e responsabilidade dos governantes. No entanto praticamente dois terços dos municípios com população até 20.000 habitantes não possui condições de disposição adequada dos seus resíduos sólidos. Embora essa prática seja tecnicamente inadequada e inaceitável, é corriqueira, e expõe o meio ambiente e a população a riscos.

O principal objetivo do trabalho foi identificar os riscos ambientais decorrentes da disposição de RSU com base em princípios geotécnicos e da saúde pública. Isto foi relacionado à atuação dos solos de cobertura, à emissão de gases e à saúde pública, mediante investigações da emissão de biogás e do estado da saúde pública no entorno de um aterro de resíduos. O trabalho apresenta uma caracterização geoambiental de sítios de disposição de resíduos sólidos urbanos, bem como um estudo de caso, especificamente um lixão existente num município do Estado do Rio de Janeiro com aproximadamente 40.000 habitantes.

A pesquisa foi realizada mediante a aplicação de questionários junto à população infantil em idade escolar. A investigação procurou avaliar e correlacionar estatisticamente a saúde das crianças ao sítio do aterro de resíduos em estudo, com base na localização geográfica das escolas e, por conseguinte, das residências dos alunos.

Abstract of Thesis presented to COPPE/UFRJ as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ENVIRONMENTAL RISKS TO MUNICIPAL SOLID WASTE LANDFILLS  
WITH GAS EMISSIONS EMPHASIS

José Luiz Gerlach Real

May/2005

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Department: Civil Engineering

The treatment and disposition of the municipal solid waste - MSW, is a continuous government concern. However practically two thirds of the municipal districts with population until 20.000 inhabitants do not dispose their waste adequately. Although it is technically inadequate and unacceptable, it is trivial, and exposes the environment and population to risks.

The main objective of this work is to identify the current environmental risks of the disposal of MSW, based on geotechnical and public health principles. It is related to the performance of the soil cover, the biogas emission and the public health of the population who lives close to the landfills. The work presents a geoenvironmental characterization of MSW sites, as well as a case study, specifically applied to an existent landfill located in a municipal district of the State of Rio de Janeiro, with as approximately 40.000 inhabitants.

The research was done by doing a survey to a population attending junior schools. The investigation tried to evaluate the behavior of the landfill and of the students, and to analyze the statistical correlation between lung diseases, students and public health.

## INDICE

<b>1</b>	<b><i>INTRODUÇÃO</i></b> .....	<b>1</b>
1.1.1	HIPÓTESES DO ESTUDO.....	1
1.1.2	RELEVÂNCIA.....	2
1.1.3	OBJETIVOS.....	5
1.1.4	DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS.....	6
<b>2</b>	<b><i>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</i></b> .....	<b>8</b>
<b>2.1</b>	<b>RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ASPECTOS GEOTÉCNICOS ENVOLVIDOS EM ATERROS</b> .....	<b>8</b>
2.1.1	CLASSIFICAÇÃO.....	9
2.1.2	CARACTERIZAÇÃO.....	9
2.1.3	TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO.....	11
2.1.4	PROJETOS DE ATERROS .....	16
2.1.5	GEOTECNIA APLICADA .....	21
2.1.6	IMPACTOS POTENCIAIS.....	36
<b>2.2</b>	<b>ANÁLISE DE RISCO</b> .....	<b>40</b>
2.2.1	RISCO .....	40
2.2.2	EXPOSIÇÃO.....	43
<b>2.3</b>	<b>GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS DE RESÍDUOS</b> .....	<b>49</b>
2.3.1	GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO .....	49
2.3.2	PRODUÇÃO DE METANO.....	55
2.3.3	IMPACTOS POTENCIAIS.....	55
2.3.4	MEDIDAS DE EMISSÕES .....	57
2.3.5	OXIDAÇÃO DE METANO NAS CAMADAS DE COBERTURA .....	60

<b>3</b>	<b><i>METODOLOGIA.....</i></b>	<b>68</b>
<b>3.1</b>	<b><i>RISCOS À SAÚDE HUMANA POR EXPOSIÇÃO A ATERROS.....</i></b>	<b>68</b>
3.1.1	OBJETIVOS.....	68
3.1.2	EXPOSIÇÃO ÀS EMISSÕES PROVENIENTES DE ATERROS.....	70
3.1.3	INVESTIGAÇÕES EPIDEMIOLÓGICAS .....	84
3.1.4	RECOMENDAÇÕES.....	93
<b>4</b>	<b><i>ESTUDO DE CASO – ATERRO DE PARACAMBI - RJ.....</i></b>	<b>95</b>
<b>4.1</b>	<b><i>AVALIAÇÃO DA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS.....</i></b>	<b>95</b>
4.1.1	CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO:.....	95
4.1.2	CARACTERIZAÇÃO DOS RECEPTORES:.....	98
4.1.3	CARACTERIZAÇÃO DOS CAMINHOS DE EXPOSIÇÃO:.....	99
<b>4.2</b>	<b><i>AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO.....</i></b>	<b>100</b>
4.2.1	CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO ESTUDADO.....	100
4.2.2	CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO E DOS CONTAMINANTES .....	109
<b>4.3</b>	<b><i>INVESTIGAÇÃO DA ATUAÇÃO DA CAMADA DO SOLO DE COBERTURA .....</i></b>	<b>114</b>
4.3.1	MATERIAIS E MÉTODOS.....	114
4.3.2	RESULTADOS .....	136
<b>4.4</b>	<b><i>INVESTIGAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA.....</i></b>	<b>151</b>
4.4.1	MATERIAIS E MÉTODOS.....	151
4.4.2	RESULTADOS .....	155
<b>5</b>	<b><i>CONCLUSÕES.....</i></b>	<b>162</b>
5.1.1	ATUAÇÃO DA COBERTURA DOS ATERROS.....	162
5.1.2	ASPECTOS EPIDEMIOLÓGICOS .....	163
5.1.3	RISCO AMBIENTAL.....	164
5.1.4	RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS.....	165
<b>6</b>	<b><i>BIBLIOGRAFIA .....</i></b>	<b>166</b>

## INDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Probabilidades de ocorrência de acidentes decorrentes de um aterro de resíduos - Riscos à saúde humana e ambientais .....	36
Tabela 2 - Fases da geração de biogás .....	52
Tabela 3 - Composição gravimétrica do lixo de Paracambi.....	111
Tabela 4 - Relação básica de materiais para realização de medições de gases .....	122
Tabela 5 - Resultados das medições 11/11/04.....	128
Tabela 6 - Resultados das medições da segunda campanha .....	130
Tabela 7 - Resultado das medições terceira campanha.....	133
Tabela 8 - Resultados das medições terceira campanha .....	135
Tabela 9 - Análise cromatográfica dos gases coletados no aterro .....	136
Tabela 10 - Valores da EPA (1996) para constante da geração de metano .....	140
Tabela 11 - Aplicação do modelo Scholl-Canyon .....	143
Tabelas 12 - Cálculo dos fatores de produção de metano - Lima .....	147
Tabela 13 – Tabela de produção total de metano - Lima .....	148

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Fases da geração de biogás .....	54
Figura 2 - Fluxograma da avaliação de exposição a aterros de RSU.....	73
Figura 3 - Localização do município de Paracambi/RJ.....	95
Figura 4 - Composição gravimétrica - RSU de Paracambi (Silveira, 2004).....	111
Figura 5 - Avaliação da Qualidade do aterro de Paracambi - IQA.....	113
Figura 6 - Curva granulométrica do solo de cobertura do aterro .....	115
Figura 7 - Curvas granulométricas dos solos abaixo do aterro .....	116
Figura 8 - Permeabilidade do solo do aterro.....	118
Figura 9 - Montagem dos drenos na camada de cobertura prevista .....	119
Figura 10 - Montagem dos drenos na camada de cobertura encontrada .....	119
Figura 11 - Dreno de gases modelo JLG-1104.....	120
Figura 12 - Monitor de Gases Dräger modelo Miniwarn .....	121
Figura 13 - Fator de correção para tonelagem depositada (World Bank, 2004).....	141
Figura 14 – Gráficos da aplicação do modelo Scholl-Canyon, com os valores calculados de geração de metano .....	144
Figura 15 - Gráfico de geração anual de metano - Lima .....	149
Figura 16 - Gráfico de geração acumulada de metano - Lima .....	149

Figura 17 - exemplo da tabulação de resultados da pesquisa .....	154
Figura 18 - programa estatístico utilizado para análise .....	155
Figura 19 - menu de ferramentas de análise do SPSS .....	156
Figura 20 - resultados da análise relativos à variável "bairro" .....	158
Figura 21 - Localização dos principais bairros da pesquisa .....	158

## INDICE DE FOTOS

Foto 1 - Vista geral do aterro com as estações A, B, e C.....	123
Foto 2 - Início das perfurações na Estação A .....	124
Foto 3 - conjunto de ferramentas para perfuração .....	124
Foto 4 – Perfuratriz utilizada.....	124
Foto 5 - complemento do furo com o trado.....	125
Foto 6 - Dreno de gases A-1.30 instalado .....	125
Foto 7 - colocação de brita no furo do DMPC.....	126
Foto 8 - Dispositivo com a tela montada.....	126
Foto 9 - DMPC alojado na base da camada de cobertura.....	126
Foto 10 - compactação da argila no DMPC.....	127
Foto 11 - Estação A pronta para início das medições .....	127

# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1.1 HIPÓTESES DO ESTUDO

As hipóteses principais formuladas nesse estudo e apresentadas nessa dissertação referem-se à disposição de resíduos sólidos urbanos – RSU - e à sua influência no estado de saúde das populações vizinhas a estes aterros, com enfoque na emissão de gases.

Considerando-se a relevância e complexidade do assunto, dividiu-se o enfoque na formulação de duas hipóteses básicas:

- 1) A atuação da camada de solo de cobertura dos aterros de RSU na minimização das emissões gasosas é efetiva;
- 2) A saúde das populações vizinhas aos aterros de RSU é afetada de maneira significativa, quando a disposição de lixo urbano é inadequada.

Dentre os vários fatores possíveis e analisados nesses casos de avaliação de impacto ambiental, optou-se por focar a contaminação por via aérea, considerando a contribuição dos estudos geotécnicos das camadas de solo de cobertura nos aterros, as quais tendem a influenciar a emissão de gases produzidos nos aterros.

### **1.1.2 RELEVÂNCIA**

Em trabalho de pesquisa recente Ribeiro et al. (2003) analisou e avaliou a influência da poluição do ar na saúde da população infantil na zona metropolitana de São Paulo, com 17 milhões de habitantes, sendo os níveis de poluição medidos e monitorados por várias estações. Em 1986, em três diferentes e contrastantes áreas amostradas, parâmetros da saúde respiratória de crianças foram coletados para avaliar a influência da poluição do ar (Ribeiro, 1988) . Doze anos mais tarde, em 1998, um estudo similar foi realizado para avaliar o impacto dos programas de controle da poluição nos sintomas respiratórios de crianças morando no mesmo tipo de vizinhança estudada anteriormente. Os resultados indicaram que os programas de controle de poluição executados desde aquela época foram em parte neutralizados pelo crescente número de veículos em circulação, e que o controle de um único poluente não foi suficiente para proteger a saúde das crianças. Nas áreas onde os níveis de materiais particulados e de dióxido de enxofre diminuíram, ocorreu a redução da predominância de sintomas respiratórios.

Esta preocupação evidenciada nas grandes cidades nas últimas décadas para a poluição decorrente dos veículos em circulação, hoje, já com esses níveis de poluição razoavelmente controlados, se volta para outras fontes de poluição e contaminação que se tornaram mais relevantes à medida que a tecnologia e o conhecimento científico sobre resíduos e poluição avançou. Como uma das potenciais fontes de poluição ambiental, o tratamento e disposição dos resíduos sólidos municipais, devido às suas características especiais envolvendo população, a administração pública e a iniciativa privada em todos os aglomerados populacionais, é atualmente alvo de pesquisas científicas importantes e necessárias para a preservação da saúde da população e do meio ambiente.

Observa-se na literatura que revisões de estudos epidemiológicos voltados para as influências da exposição de pessoas a aterros de resíduos indicam que existe um potencial para efeitos adversos à saúde humana da população residindo próximo a essas áreas. No entanto a exposição humana é geralmente muito mal caracterizada nos estudos epidemiológicos antigos o que constitui a principal limitação para o estabelecimento das relações causais objetivadas.

Para que se consiga caracterizar uma situação de risco ambiental não tolerável, isto é, uma situação onde a quantificação do perigo ambiental exceda os limites estabelecidos para a preservação do bom estado de saúde da população ou do meio ambiente, é necessário que seja caracterizada uma via completa de exposição. Ou

seja, investigações epidemiológicas são recomendadas somente quando a caracterização de sítios e populações, caracterização das vias de exposição, monitoramento ambiental e/ou estimativas de exposições tenham indicado uma provável existência de uma completa via de exposição, isto é, fonte-via de exposição-receptor.

Quando esta via completa de exposição é estabelecida num sítio de interesse, existirão vários caminhos para desenvolver esses estudos. Uma investigação ambiental é somente uma delas. Outras opções são conduzir avaliação de risco/impacto à saúde humana ou padronizar vigilância sanitária.

A avaliação de risco/impacto à saúde objetiva caracterizar qualitativamente e/ou quantitativamente os riscos à saúde relacionados a um sítio específico, baseado nas concentrações dos contaminantes emanados, suas vias de exposição e seus perfis toxicológicos.

Vigilância sanitária é um sistema de rotinas para relatar casos dentro dos sistemas existentes de controle da saúde. A análise dos dados obtidos deverá indicar se existe um aumento significativo no número dos casos de interesse. Uma rede sentinela de saúde próxima ao sítio de resíduos poderá manter um observador da população alvo e notificar quando alguma outra investigação ou ação deverá ser realizada.

Estudos epidemiológicos de sítios de disposição de resíduos podem ser divididos naqueles que estudam os resultados de indicadores em um único sítio, e outros que estudam os indicadores nas proximidades de muitos sítios de disposição de resíduos. Os estudos para sítios únicos são geralmente utilizados para situações relativamente comuns de resultados de saúde, como por exemplo efeitos respiratórios, ou em situações onde o sítio é localizado numa área de alta densidade populacional. Os estudos para múltiplos sítios são recomendados para o estudo de casos raros de saúde, como por exemplo cânceres e desordens reprodutivas. É geralmente mais difícil e requer mais recursos para coletar informações detalhadas do sítio e das características populacionais e sua exposição quando muitos sítios são incluídos no estudo. Estudos de múltiplos sítios têm a vantagem de permitir a investigação de gradientes de exposição (comparando alta, média e baixa exposição entre sítios com contaminantes similares). O estabelecimento de um gradiente exposição-resposta é especialmente válido na avaliação causal.

Em todos os projetos de estudos discutidos acima, validar a avaliação da exposição é essencial. Várias abordagens estão disponíveis para avaliação da exposição de populações humanas às substâncias contidas em sítios de resíduos. O

U.S. National Research Council tem mostrado a hierarquização da qualidade de dados para as diferentes avaliações de exposições. Muitos estudos do passado têm utilizado abordagens focando a base da hierarquização tal como a proximidade residencial ao sítio ou residência na área geográfica que contém o sítio. Objetivando um avanço no conhecimento científico, é muito recomendável que as abordagens com base no topo da lista sejam utilizadas nas futuras investigações epidemiológicas.

Exposição é definida como o contato, no tempo e no espaço, entre uma pessoa e um ou mais agentes biológicos, químicos ou físicos. A avaliação de exposição identifica e define as exposições que ocorrem, ou são antecipadas para ocorrer, nas populações humanas. Exposição é definida pela concentração de um agente ambiental num meio de transporte no meio ambiente, no ponto de contato com o corpo humano, junto com a duração do contato. Para pequenas exposições é usual estimar a soma das concentrações instantâneas ao longo do tempo; para longas durações de exposição (meses ou anos), exposição é usualmente representada por uma concentração média ao longo do período de exposição.

As abordagens de avaliação quantitativa de exposição podem ser classificadas em duas categorias: método de avaliação direta (medida) e de avaliação indireta (estimada). Essas duas abordagens são independentes e complementares. Cada uma resulta em diferentes tipos de dados e tem diferentes pontos fortes e pontos fracos. É muito importante e útil, entretanto, empregar múltiplas abordagens de forma a checar a representatividade dos resultados.

### 1.1.3 OBJETIVOS

Os objetivos principais dessa pesquisa são todos relacionados à tentativa de formulação e aplicação de diretrizes básicas para a avaliação dos riscos ambientais decorrentes da disposição de resíduos sólidos urbanos, com ênfase na emissão de gases.

Considerando-se os diferentes meios físicos (ar, água e solo) através dos quais ocorre a exposição e contaminação de seres humanos, essa pesquisa objetiva especificamente identificar procedimentos de medição de emissões gasosas de aterros de resíduos. Não está no seu escopo a contaminação pelo meio líquido, mas considerações sobre poeiras são importantes no tratamento do assunto. O foco principal são os gases produzidos, suas medições de vazão e composição, assim como as considerações técnicas, principalmente geotécnicas, que influenciam a emissão de gases e o seu transporte.

Objetiva-se, através da utilização de modelo conceitual apresentado, disponibilizar uma ferramenta que poderá ser de grande utilidade, tanto para gestores das políticas públicas de saneamento quanto de pesquisadores do tema. Essa utilidade poderá ser tanto para melhor estruturar as informações necessárias para a caracterização dos cenários e problemas encontrados quanto para identificar os estudos epidemiológicos necessários.

Objetiva-se também a definição da melhor formatação dos estudos epidemiológicos necessários para o caso dos RSU e como obter a correlação dos seus resultados com o cenário caracterizado da disposição dos resíduos numa região.

Objetiva-se com essa ferramenta, específica para avaliação de exposição a aterros de resíduos sólidos urbanos, disponibilizar um auxílio para que os administradores municipais, responsáveis por passivos ambientais existentes na sua área de atuação, busquem junto aos órgãos públicos estaduais e federais, recursos financeiros adequados à extensão do seu problema. Infelizmente para a população, muitas das vezes as prefeituras deixam de receber recursos financeiros disponíveis na esfera federal devido, única e exclusivamente, à falta de projetos, ou ante-projetos, ou mesmo memoriais descritivos, tecnicamente fundamentados, de forma que o administrador central consiga enquadrar aquela necessidade.

#### 1.1.4 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

Os capítulos constituintes dessa dissertação estão estruturados da forma a seguir apresentada, para o que fazemos a descrição sumária de seus conteúdos:

- **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA:**
- São apresentados três tópicos considerados relevantes para a fundamentação da dissertação:
  - **Resíduos sólidos e Geotecnia:** A caracterização dos resíduos sólidos urbanos – RSU, os procedimentos aceitáveis e os recomendáveis para a disposição em aterros, e os aspectos referentes à geotecnia de resíduos, principalmente aqueles que se relacionam aos processos de interação solo-contaminante. Também é apresentada uma análise dos principais aspectos geotécnicos envolvidos em aterros de RSU, sejam eles do tipo sanitário ou mesmo da forma de lixão. Objetiva-se posicionar o assunto resíduos relacionando-o à engenharia geotécnica, principalmente quanto aos fatores que resultam em impactos ao meio ambiente e à vida humana.
  - **Riscos:** conceituação, avaliação de exposição e toxicidade, caracterização de riscos e sua quantificação, envolvendo os aspectos desse estudo, voltados a RSU.
  - **Biogás:** são apresentados os fatores inerentes à geração de biogás nos aterros de resíduos sólidos urbanos, à sua emissão para a atmosfera, assim como a minimização dessa emissão pela atuação das camadas de cobertura de aterros.
- **METODOLOGIA**
- Com base numa metodologia discutida e proposta pela OMS (Organização Mundial da Saúde) em 2000 (WHO, 2000), é apresentada uma proposta de utilização desse trabalho aplicado aos casos brasileiros, considerando-se a objetividade daquela estruturação, de suas diretrizes para avaliação da exposição às emissões perigosas provenientes de aterros de resíduos, assim como das suas recomendações para as investigações epidemiológicas aplicáveis. Essa metodologia foi utilizada no estudo-de-caso de Paracambi procurando-se a validação da proposta.

- **ESTUDO DE CASO**
- Foi realizado o estudo de caso focando o município de Paracambi, RJ, e mais especificamente o local de disposição dos seus resíduos sólidos municipais há mais de trinta anos, localizado junto ao Rio dos Macacos próximo ao centro da cidade.
  - **Caracterização do aterro de lixo:** Foram caracterizados, o município, nos seus vários aspectos relevantes ao estudo, os seus resíduos e os solos do local da disposição em estudo.
  - **Ensaio realizado:** São apresentados os ensaios realizados na área do aterro para a caracterização dos solos em utilização e, principalmente, das emissões dos gases gerados no aterro, ênfase desse trabalho.
  - **Emissões de biogás:** A partir de dois modelos matemáticos foram calculadas as vazões de gases gerados no aterro de Paracambi, comparando os resultados com os ensaios realizados.
  - **Pesquisa epidemiológica:** São apresentados os resultados da aplicação dos questionários para a pesquisa epidemiológica da população do entorno do lixão, buscando-se identificar através de um estudo de caso-controle as correlações para justificar um maior aprofundamento no estudo em questão.
  - **Aplicação da metodologia:** Foi realizada e apresentada a aplicação da metodologia adotada, para o caso de Paracambi, visando a sua validação.
- **CONCLUSÕES**
- São apresentadas as conclusões gerais, decorrentes da pesquisa realizada, e as específicas, resultantes do estudo de caso de Paracambi.
- **RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS**
- São apresentadas as indicações dos possíveis estudos a desenvolver, principalmente no que se refere ao atendimento completo às diretrizes estabelecidas na metodologia proposta, cujo planejamento e aplicação demandam um período de tempo bem mais amplo do que o utilizado nas pesquisas atuais.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo de revisão bibliográfica estão apresentados e descritos os aspectos técnicos considerados relevantes para o melhor entendimento da dissertação, sua fundamentação, desenvolvimento e conclusões.

Os três tópicos principais desenvolvidos são:

- **Resíduos Sólidos Urbanos** – caracterização de resíduos, de aterros, e os aspectos relacionados à geotecnia de resíduos.
- **Risco** – conceituação e fundamentos de quantificação;
- **Biogás** – aspectos referentes à geração de gases nos aterros, à caracterização das suas emissões, e à atuação das camadas de cobertura em argila.

---

---

### 2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: UMA ANÁLISE DOS PRINCIPAIS ASPECTOS GEOTÉCNICOS ENVOLVIDOS EM ATERROS

É apresentada a seguir uma caracterização de Resíduos Sólidos Urbanos - RSU e dos sistemas usuais de seu tratamento e disposição, assim como uma conceituação de aterros sanitários e sua aplicação atualmente.

Essas considerações são importantes nos projetos de novos aterros e no entendimento dos problemas dos existentes, principalmente daqueles com disposição inadequada dos resíduos, tais como os lixões, comumente chamados de vazadouros.

Dentre os diversos aspectos técnicos envolvidos com projetos e operação de aterros de RSU, busca-se a seguir enfatizar aqueles mais diretamente relacionados ao assunto desta pesquisa, ou seja, a geotecnia envolvida com os solos de cobertura e de base dos aterros, e a geração de biogás. Desta forma apresentamos a seguir estes tópicos de interesse relacionados a RSU:

- Classificação;
- Caracterização;

- Disposição e tratamento;
- Geotecnia de resíduos
- Projetos de aterros;
- Sistemas de drenagem de efluentes gasosos;
- Impactos potenciais.

### **2.1.1 CLASSIFICAÇÃO**

Denomina-se lixo os restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis.

São várias as formas possíveis de se classificar o lixo, como por exemplo:

- o Por sua natureza física: seco e molhado; sólido, semi-sólido, líquido;
- o Por sua composição química: matéria orgânica e matéria inorgânica;
- o Pelos riscos potenciais ao meio ambiente: perigosos, não-inertes e inertes.
- o Quanto à origem, ou seja, domiciliar, comercial, varrição e feiras livres, serviços de saúde e hospitalar, portos, aeroportos e terminais ferroviários e rodoviários, industriais, agrícolas e entulhos.

São enfocados a seguir os aspectos geotécnicos relacionados ao chamado Lixo Municipal, ou Resíduos Sólidos Urbanos – RSU, que são aqueles gerados no ambiente urbano e constituídos pelos materiais de origem domiciliar, de estabelecimentos de comércio, de serviços de varrição e de feiras livres, sendo de atribuição e responsabilidade exclusiva das prefeituras, desde a coleta até a destinação final.

### **2.1.2 CARACTERIZAÇÃO**

Vários fatores e informações são necessários para um perfeito conhecimento e planejamento do gerenciamento dos resíduos urbanos, tais como: o número de habitantes do município, o poder aquisitivo da população, condições climáticas da região, hábitos e costumes da população e nível educacional. A influência destes fatores é melhor expressa pela quantidade de lixo gerada, pela sua composição física e parâmetros físico-químicos, todos indispensáveis ao correto prognóstico de cenários futuros.

Destacam-se a seguir as principais informações necessárias ao planejamento e gerenciamento do manejo de RSU, ou seja, daquele conjunto de procedimentos inerentes à coleta, ao transbordo e transporte, à triagem, ao reaproveitamento, ao

reuso, à reciclagem, ao tratamento e à sua disposição final. Também aí incluídos os resíduos inerentes à varrição, à limpeza, à capina e poda de árvores em vias e logradouros públicos e outros serviços pertinentes à limpeza urbana.

- Taxa de geração por habitante em kg/hab-dia;
- Composição física;
- Densidade aparente;
- Umidade;
- Teor de materiais combustíveis e incombustíveis;
- Poder calorífico;
- Composição química;
- Teor de matéria orgânica.

A caracterização dos RSU é realizada através de processos normatizados e recomendados de amostragens dos resíduos gerados numa região. É obtida com o uso de metodologias de simples aplicação, facilmente executadas por técnicos das prefeituras ou empresas terceirizadas, obtendo-se as informações básicas para a caracterização dos resíduos gerados. Os demais parâmetros mais sofisticados, tais como o poder calorífico do lixo e a determinação de elementos químicos específicos, devem ser analisados em laboratórios especializados.

Desta forma são obtidos os parâmetros do teor de umidade e de material seco, a densidade aparente em kg/m<sup>3</sup>, além dos dados da composição física dos resíduos. Normalmente são identificados os seguintes componentes: borrachas, couros, madeira, matéria orgânica, metais ferrosos, metais não-ferrosos, papel, papelão, plástico duro, plástico-filme, trapos, vidro e outros materiais.

Estes materiais ainda podem possuir componentes putrescíveis, recicláveis e combustíveis.

Quanto à composição gravimétrica, os percentuais médios do lixo domiciliar no Brasil, conforme Philippi Júnior (1999), IBAM (2001), Silveira (2004), indicam nas médias brasileiras, matéria orgânica (materiais orgânicos putrescíveis) entre 53% a 65%, vidro 2 a 3%; papel/papelão 20 a 25%; plástico 2 a 3%; metais 2 a 4%; outros, 15 a 20%.

Nos programas de coleta seletiva implantados no Brasil, nos quais é realizada a segregação de materiais com o objetivo de seu reaproveitamento e reciclagem, temos em média a seguinte composição: alumínio – 0,7%; papel/papelão – 39,0%; plástico –

15,0%; embalagem cartonada tipo longa vida – 2,0%; vidro – 15,0%; outros metais – 15,0%; rejeitos – 13,3% (IPT/CEMPRE, 2000).

É importante ressaltar os componentes potencialmente perigosos no lixo domiciliar. São considerados perigosos aqueles materiais descartados que possam pôr em risco a saúde do homem ou o meio ambiente.

No lixo municipal são vários os produtos contendo substâncias que conferem características de inflamabilidade, corrosividade, oxi-redução ou toxicidade. Dentre eles são destacados: materiais para pintura (tintas, solventes, pigmentos, vernizes); materiais para jardinagem e animais (pesticidas, inseticidas, repelentes e herbicidas); materiais automotivos (óleos lubrificantes, fluidos de freio e transmissão, baterias); outros itens, tais como pilhas, frascos de aerossóis em geral, lâmpadas fluorescentes, etc.

No caso do descarte de pilhas e lâmpadas fluorescentes temos um exemplo relevante do grande problema ambiental provocado por substâncias perigosas no lixo domiciliar, pois esses produtos são considerados resíduos perigosos por conterem metais pesados, contaminantes que podem integrar-se à cadeia alimentar do homem.

### 2.1.3 TRATAMENTO E DISPOSIÇÃO

Dos vários tipos de tratamento, processamento e disposição dos resíduos sólidos urbanos em uso atualmente no Brasil, além da segregação para reciclagem anteriormente citada, destacam-se:

- **Compostagem:** é um processo de digestão anaeróbia onde a matéria orgânica putrescível é degradada pela ação conjunta de microrganismos anaeróbios até a completa mineralização, daí resultando a geração de biogás onde predominam gás carbônico e metano, e um resíduo sólido passível de uso para fins agrícolas.
- **Reciclagem do papel:** atualmente a tecnologia de reciclagem de papel está de tal modo adiantada tecnologicamente que permite até mesmo a reciclagem de materiais antes considerados não-recicláveis como as embalagens cartonadas tipo longa vida.
- **Reciclagem de plástico:** representa um volume significativo, e sua separação do restante do lixo traz uma série de benefícios à sociedade como, por exemplo, o aumento da vida útil dos aterros, geração de empregos, economia de energia, etc.

- **Reciclagem de vidro:** o vidro é 100% reciclável, não ocorrendo perda de material durante o processo de fusão. Para cada tonelada de caco de vidro limpo, obtém-se praticamente uma tonelada de vidro novo.
- **Reciclagem de metais:** a grande vantagem da reciclagem de metais é evitar as despesas da fase de redução do minério a metal. Esta fase envolve um alto consumo de energia, e requer transporte de grandes volumes de minério e instalações caras, destinadas à produção em grande escala.
- **Reciclagem de entulho:** o processo de reciclagem do entulho (conjunto de fragmentos ou restos de tijolo, concreto, argamassa, aço, madeira, etc.) para a obtenção de agregados, basicamente envolve a seleção dos materiais recicláveis do entulho e a trituração em equipamentos apropriados.
- **Tratamento térmico:** Os RSU assim como os resíduos dos serviços de saúde (RSS) podem ser tratados termicamente antes de sua disposição final em aterros. Estes tratamentos térmicos podem ser classificados como sendo de alta ou de baixa temperatura. No tratamento térmico através da incineração, com temperaturas de 1200°C, ocorre a combustão e destruição/inertização da fração orgânica dos resíduos com redução significativa da sua massa e de volume (90%).
- **Disposição final de resíduos em aterros:** é o método mais difundido e utilizado para a disposição final dos resíduos urbanos, assim como também de resíduos industriais. Sua utilização requer técnicas especiais de disposição no solo, assim como um conhecimento aprofundado das propriedades físicas, químicas e mecânicas, tanto da massa de resíduos como do solo, de forma a garantir as condições de proteção ao meio ambiente nos mais diversos e agressivos cenários.

Os sistemas de tratamento e disposição de RSU usualmente são realizados por vários desses processos, de forma integrada. Dessa forma busca-se utilizar as melhores e mais adequadas características de cada processo, aplicáveis a cada caso, objetivando-se a mais segura e mais eficaz forma de disposição final dos resíduos.

### **PRÉ-TRATAMENTO MECÂNICO-BIOLÓGICO DE RSU**

A seguir são apresentados e relacionados aspectos gerais referentes ao processo de pré-tratamento mecânico-biológico de resíduos sólidos urbanos, contendo

uma descrição sumária do processo, as principais etapas de implantação e pontos importantes destacados em publicações sobre o assunto.

Objetiva-se transmitir tópicos que auxiliem uma melhor caracterização do processo, sua utilização e os seus benefícios, principalmente considerando-se suas características de inertização da massa de resíduos reduzindo significativamente a emissão de contaminantes, questão central no processamento de um aterro de resíduos.

Das soluções relacionadas para o tratamento e a minimização de tais problemas destacam-se aquelas ações relativas às reduções de geração dos resíduos enviados para aterros. Essas reduções são obtidas através da implantação de programas comunitários de educação ambiental assim como das atividades de segregação dos rejeitos e do seu conseqüente reaproveitamento, reciclagem e reutilização.

Também deve ser considerada uma maior utilização dos processos de compostagem dos resíduos, com o aproveitamento do produto, o composto orgânico estabilizado, em atividades agrícolas.

É importante destacar que um aumento na destinação final de resíduos perigosos, principalmente os resíduos dos serviços de saúde, através da incineração ou inertização via plasma térmico, tem potencial para evitar conseqüências muito graves para a saúde humana, desde que bem projetada, executada e operada. São tecnologias que, apesar de seu aparente custo elevado, apresentam fatores positivos que nem sempre são corretos e devidamente quantificados em todos os seus aspectos ambientais e econômicos.

Além dessas soluções, a outra alternativa importante para solução do problema é a utilização dos sistemas de pré-tratamento mecânico-biológico de resíduos domiciliares. São processos ecológicos e de baixo custo e que reduzem a quantidade de resíduos dispostos em aterros assim como solucionam, de forma eficaz, os impactos ambientais daí resultantes. Dessa forma resultam por oferecer vantagens concretas aos problemas citados. Para a minimização dos impactos ambientais, o tratamento mecânico-biológico torna-se etapa importante da disposição final e a sua utilização resulta na minimização dos impactos atuais e futuros para o meio ambiente, além de serem obtidos resultados imediatos no que se refere a aspectos ambientais e econômicos, tais como:

- Os impactos oriundos das emissões de metano e chumbo são reduzidos em cerca de 95%.

- Extingue-se o desconforto gerado pelo odor, pássaros ou papéis soltos.
- São obtidos índices elevados de aproveitamento, com pelo menos 55 % da massa reaproveitada na forma de material e energia.
- Como o volume de resíduos é reduzido significativamente, uma menor área de aterro é utilizada, o que resulta no prolongamento de sua vida útil.
- Nenhum passivo ambiental é gerado, enquanto métodos tradicionais de disposição tendem a causar impactos de até 100 anos, exigindo acentuada manutenção posterior.

Os resíduos descarregados são submetidos a uma triagem inicial com o intuito de resgatar os materiais volumosos ou prejudiciais ao processo. Em seguida, o material restante é submetido ao tratamento mecânico onde ocorrerá o rompimento estrutural e a homogeneização da massa de resíduos.

Como esta etapa acontece em um tambor de homogeneização fechado poderão ser adicionados líquidos, tais como chorume proveniente de antigo aterro.

Desta forma o processo mecânico apresenta mais uma vantagem na redução dos custos, no caso os referentes ao tratamento de chorume.

Após o tratamento mecânico segue-se o biológico. A etapa de tratamento biológico objetiva atender às exigências das normas ambientais onde a decomposição da matéria orgânica putrescível (MOP) presente nos resíduos será decomposta microbiologicamente através de reações aeróbias.

Essa decomposição biológica ocorrerá durante um período de 9 a 12 meses, e se constitui no objetivo principal do tratamento.

Após o tratamento biológico, os resíduos são dispostos em aterros, em camadas finas altamente compactadas. Constata-se, por acompanhamentos monitorados, que os aterros assim constituídos possuem um potencial muito pequeno de produção de biogás. O potencial de emissão é substancialmente minimizado, a contaminação orgânica dos líquidos é nitidamente reduzida, e o atendimento dos parâmetros exigidos na geração de lixiviados são integralmente atendidos.

É alcançada então uma boa estabilidade estrutural no corpo do aterro, e recalques oriundos da decomposição biológica da fração orgânica são evitados.

Observe-se também que os resíduos depositados em aterro, sem pré-tratamento, possuem uma concentração elevada de materiais reaproveitáveis. Tais materiais poderão ser reprocessados como fração reutilizável, ou mesmo no processamento energético. Existem diversas concepções de tratamento para

reaproveitamento e/ou reutilização dos materiais presentes nos resíduos domiciliares. Para que isso ocorra são necessárias várias etapas prévias à disposição nos aterros tais como uma representativa caracterização dos materiais reaproveitáveis.

Para isso são enfocadas duas identificações básicas:

- 1) A dos materiais/frações comburentes: esses materiais, após segregação da massa de resíduos serão submetidos a uma classificação separando-se as frações comburentes com valor calorífico acima de 20.000 kJ/kg com o objetivo do seu processamento térmico. Dessa forma recupera-se energia na forma térmica ou elétrica. Considere-se ainda que um processamento térmico não é comparável a uma incineração de resíduos comum pois esta técnica, a partir de resíduos com alto poder calorífico está mais próxima de um processamento de uma usina elétrica do que de uma incineração de lixo convencional.
- 2) A da reutilização dos materiais diferenciados, considerando que nos materiais restantes existe ainda uma parcela grande de materiais reutilizáveis. As atividades de beneficiamento poderão recuperar as frações menores e reintegrá-las na indústria da construção.

Esse tipo de tratamento oferece vantagens, tais como:

- 1) Requer um investimento mínimo para aquisição de equipamentos técnicos e materiais, viabilizando a operação;
- 2) O cliente, pela livre escolha dos equipamentos, não se compromete com uma tecnologia em equipamentos de longa duração;
- 3) O tratamento, pela sua flexibilidade e possibilidade de modulação, poderá ser empregado em outras atividades, como por exemplo a reabilitação de aterros antigos;
- 4) O sistema de aeração empregado no tratamento biológico é natural, dispensando energia suplementar, resultando por não incrementar as emissões de CO<sub>2</sub>;
- 5) O tratamento atende às normas ambientais vigentes mais restritivas.

## 2.1.4 PROJETOS DE ATERROS

### TIPOS DE ATERROS

São encontrados na prática dos municípios brasileiros três tipos de disposição dos resíduos sólidos urbanos: o aterro sanitário, o aterro controlado e o lixão.

**Aterro sanitário** é um processo utilizado para a disposição de resíduos sólidos no solo, particularmente lixo domiciliar, o qual, fundamentado em critérios de engenharia e normas operacionais específicas, permite um confinamento seguro em termos de controle de poluição ambiental e de proteção à saúde pública.

Caracteriza-se por ser uma instalação de destinação final de resíduos através de sua adequada disposição no solo, sob controle técnico e operacional permanente, de modo a que nem os resíduos, nem os seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública ou ao meio ambiente.

**Aterro controlado** é um método de disposição de RSU no solo que visa minimizar possíveis danos ou riscos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Este método utiliza alguns princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte adequado na conclusão de cada jornada de trabalho de disposição no solo.

É uma instalação destinada à disposição de RSU, na qual algumas modalidades de controle sejam periodicamente exercidas, quer sobre o maciço de resíduos, quer sobre seus efluentes. Admite-se, desta forma, que o aterro controlado se caracterize por um estágio intermediário entre o lixão e o aterro sanitário.

O chamado **“lixão”** é uma forma inadequada de disposição dos resíduos sólidos urbanos que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Tem o mesmo significado que “descarga de resíduos a céu aberto”, ou simplesmente “vazadouro”. São locais em que os resíduos, de todas as origens e naturezas, são simplesmente lançados, sem qualquer tipo ou modalidade de controle, sobre os resíduos ou sobre seus efluentes.

Uma das principais características deste tipo de unidade de disposição é a existência de queima de resíduos sólidos sobre a superfície do solo, ou em valas abertas no mesmo, sem qualquer tipo de controle. Também a existência de domicílios na área da unidade de disposição, geralmente pertencentes a catadores de materiais

recicláveis que ali executam o seu trabalho, neste caso com a concordância ou conivência do órgão responsável pela gestão da unidade. Destaque-se também a presença rotineira de animais como porcos, vacas ou cavalos.

Outros tipos de aterros são:

#### **Aterros de inertes ou de resíduos da construção civil**

São instalações onde são empregados técnicas e princípios adequados de engenharia para a correta disposição de resíduos da construção civil classe A (conforme classificação da Resolução CONAMA 307 de 05/07/2002) e de resíduos inertes no solo de maneira tal que não venham a causar danos à saúde pública e/ou ao meio ambiente, confinando-os e reduzindo-os ao menor volume possível, visando ao acúmulo de materiais previamente segregados, de forma a possibilitar seu uso futuro. Também se considere a atividade deste tipo de aterro para a possibilidade de utilização da área aterrada para outros fins, previamente definidos.

#### **Aterros industriais**

São instalações de destinação, final ou transitória, de resíduos industriais através de sua adequada disposição no solo, sob controle técnico e operacional permanente, de modo a que nem os resíduos, nem seus efluentes líquidos e gasosos, venham a causar danos à saúde pública ou ao meio ambiente.

### **LOCAIS PARA ATERROS SANITÁRIOS**

A melhor adequação de um local de disposição de resíduos sólidos municipais para uso como área de aterro sanitário decorre da análise e avaliação de três conjuntos de parâmetros relacionados, respectivamente, à qualidade natural do local utilizado para o aterro, à infra-estrutura instalada e aos procedimentos operacionais adotados.

Dentre os critérios mais importantes para a avaliação de uma área destinada para disposição de RSU destaca-se a aptidão natural do terreno, avaliada em função de características tais como a biota, as tendências de uso, a ocupação e uso do solo no entorno da área, a hidrogeologia, a geologia e a geotecnia dos solos envolvidos.

### **ASPECTOS TÉCNICOS A CONSIDERAR**

Os aspectos mais importantes para se considerar no planejamento, projetos, manutenção, ou mesmo, na reavaliação e remediação de áreas em uso, são

## **PLANEJAMENTO**

- **Aspectos sanitários:**
  - Movimentação e conformação da massa de lixo;
  - Eliminação de fogo e fumaça;
  - Delimitação da área de operação;
  - Limpeza da área de domínio;
- **Aspectos ambientais;**
  - Drenagem de águas pluviais;
  - Drenagem de biogás e percolado da massa de lixo;
  - Arborização em torno da área;
  - Cuidados para evitar contaminação das águas subterrâneas;
- **Aspectos operacionais:**
  - Vias de acesso;
  - Controle do recebimento de resíduos;
  - Inspeção dos tipos de resíduos recebidos;
  - Controle das atividades de catação para a reciclagem;
  - Manejo diário dos resíduos;
  - Controle das frentes de trabalho para a disposição;
  - Controle e segurança da área;

## **PROJETOS**

O conceito de aterro sanitário deve ser entendido como o local onde o lixo deve ser purificado, minimizando o impacto negativo ao meio ambiente.

Existem quatro linhas principais de tratamento nos aterros sanitários:

- Tratamento por digestão anaeróbia:
- Tratamento por digestão aeróbia:
- Tratamento biológico:
- Tratamento por digestão semi-aeróbia:

Para a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos a ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – disponibiliza a norma

NBR 8419 de 04/1992, que fixa as condições mínimas exigíveis para um projeto deste tipo.

Dentre as várias condições gerais e específicas contidas na norma, destacam-se os seguintes aspectos técnicos de engenharia nelas contidos:

- infra-estrutura de acesso e circulação;
- geometria de conformação das células de lixo, com os respectivos sistemas de drenagem de biogás, percolados e águas superficiais;
- exploração de jazidas de solo para material de cobertura;
- operação diária/mensal do aterro sanitário, definindo-se coberturas temporárias e definitivas nas células acabadas;
- tratamento superficial da cobertura do aterro, adequado ao destino final da área;
- tanque de armazenamento de percolados e sistemas de tratamento associados;
- recuperação e/ou queima de biogás;
- monitoramento geotécnico e ambiental, incluindo piezometria, poços de amostragem, inclinômetros, marcos superficiais e controle de vazão de percolado;
- obras complementares, incluindo edificações (escritórios, refeitório, vestiário, etc.), balança, cercas, defensas e guaritas.
- construção das redes de drenagem de águas superficiais, águas subterrâneas, do percolado e do biogás, concomitante à formação das células e camadas.
- coleta dos efluentes líquidos provenientes da decomposição dos resíduos e seu tratamento adequado para as condições do corpo d'água que receberá as emissões.

Os principais componentes de um projeto de um aterro sanitário são:

- Concepção do tratamento dos resíduos a serem dispostos;
- Sistema de operação do aterro sanitário;
- Sistema de drenagem da fundação;
- Sistema de impermeabilização da base do aterro;
- Sistema de cobertura dos resíduos;
- Sistema de drenagem das águas pluviais;
- Sistema de drenagem de líquidos percolados;

- Sistema de drenagem de biogás;
- Sistema de tratamento dos líquidos percolados;
- Sistema de tratamento dos gases;
- Sistema de monitorização;
- Fechamento do aterro.

## MANUTENÇÃO

A manutenção das características de aterro sanitário requer estreita obediência às especificações técnicas do projeto. Dentre as situações emergenciais possíveis de ocorrer, exigindo decisões imediatas, e que devem ser consideradas nos projetos, podem ser citadas:

- Ineficiência da drenagem do percolado;
- Ineficiência dos drenos de águas superficiais;
- Ineficiência da impermeabilização de base, provocando infiltrações no lençol freático;
- Erosão nas camadas de cobertura de solo;
- Migração de biogás e percolado para áreas vizinhas;
- Instabilização de taludes de solo, naturais e/ou construídos;
- Ocorrência de trincas e deformações excessivas;
- Escorregamentos da massa de lixo.

## SELEÇÃO DE ÁREAS PARA ATERROS

A seleção de áreas apropriadas para uso como aterros sanitários deve contemplar um conjunto de dados dos meios físico, biótico e socioeconômico os quais devem ser analisados em escala regional, para que sejam escolhidas as áreas potencialmente aproveitáveis para a instalação do aterro.

Dentre estas informações destacamos:

- **Dados geológicos-geotécnicos:** são as informações sobre as características e ocorrências de materiais que compõem o substrato dos terrenos.
- **Dados pedológicos:** são as informações sobre as características e distribuição dos solos na região estudada.

- **Dados geomorfológicos:** dizem respeito às informações sobre as formas e a dinâmica do relevo dos terrenos analisados.
- **Dados sobre as águas subterrâneas e superficiais:** referem-se ao conjunto de informações sobre o comportamento natural da dinâmica e da química das águas subterrâneas e superficiais de interesse para abastecimento público.
- **Dados climatológicos:** dizem respeito às informações sobre chuvas, temperaturas e ventos, de interesse para as estimativas de geração de percolado, dimensionamento dos sistemas de águas pluviais e dispersão de gases, poeira, ruído e odores.
- **Dados sobre legislação:** referem-se às informações sobre as leis ambientais federais, estaduais e municipais e outros condicionantes do ponto de vista da legislação.
- **Dados socioeconômicos:** estes dados referem-se às informações de cunho social e econômico que podem ser traduzidas em condicionantes para as decisões técnicas e políticas de escolha de áreas para instalação de aterros sanitários.

### 2.1.5 GEOTECNIA APLICADA

Dos vários parâmetros que permitem identificar a melhor área para instalação de um aterro sanitário, aqueles relacionados ao meio físico (solos e rochas) são os mais relevantes em vista da sua grande influência nos aspectos de estabilidade, impermeabilização e confiabilidade dos sistemas de contenção projetados.

Desta forma são efetuadas determinações do perfil geológico-geotécnico e da permeabilidade do solo, avaliada a capacidade de carga e deformabilidade do terreno de fundação, as condições de estabilidade do maciço e adjacências, a suscetibilidade do terreno à erosão e efetuada a caracterização dos materiais de empréstimo utilizados para a execução da cobertura e impermeabilização de base.

Também a determinação dos parâmetros relacionados ao comportamento da água subterrânea é muito importante na fase de escolha de uma área destinada a maciços sanitários. Dos levantamentos realizados são obtidos dados referentes a: profundidade do lençol freático, padrão de fluxo subterrâneo, gradientes hidráulicos subterrâneos, parâmetros hidráulicos do aquífero, assim como a avaliação de amplitude da variação regional do lençol freático de acordo com as estações do ano, qualidade das águas subterrâneas e riscos de contaminação do aquífero.

Além destes, e também muito importante, é necessária a análise da estabilidade dos maciços de solo e de resíduos sólidos.

A análise de estabilidade dos maciços de solo da fundação e da massa de lixo disposta no aterro deve ser efetuada a partir de parâmetros específicos e utilizando-se métodos de análise adequados ao tipo e às condições do local em consideração.

A finalidade desta análise é a obtenção do modelo de ruptura desses maciços para se definir a geometria estável do aterro e de seu entorno, adotando-se critérios de segurança adequados para obras civis.

São considerados os seguintes aspectos:

- Resistência ao cisalhamento;
- Compressibilidade do solo de fundação local (conformação geológico-geotécnica do solo local);
- Comportamento geomecânico do maciço de lixo com os seguintes fatores:
  - Coesão ( $c$ );
  - Ângulo de atrito interno ( $\varphi$ );
  - Peso específico do lixo ( $\gamma$ );
- Projeto geométrico das células (altura de lixo e inclinação dos taludes);
- Nível de percolado (estado de saturação) e sua flutuação dentro da massa de lixo (pressão neutra e condições de drenagem de biogás e percolado);
- Composição da cobertura final e sua resistência à erosão.

Os trabalhos de campo incluem inspeções, prospecções e instrumentação. Com os dados obtidos, efetua-se a análise empregando-se modelos matemáticos e simulações computacionais.

## **PROCESSOS DE INTERAÇÃO SOLO-CONTAMINANTE**

Processo de interação solo-contaminante é todo o conjunto de mecanismos e reações internas decorrentes da passagem de espécies químicas através do solo, e que implica em mudanças nos dois agentes envolvidos, solo e contaminante, em relação às suas respectivas condições iniciais. (Barbosa, 2001, Ehrlich, 2002, Almeida, 2002).

O solo é um produto do intemperismo físico-químico da rocha de origem e do modo de transporte e deposição dos sedimentos assim formados. Suas características físicas e químicas são determinadas pelo processo de formação e pelas características

do ambiente em que ocorre (clima, condições de drenagem, composição química das águas superficiais e subterrâneas, etc). Na escala de tempo da engenharia pode-se considerar o solo em equilíbrio com as fases líquida e gasosa.

Neste sentido qualquer alteração das condições ambientais representa um desequilíbrio em potencial daquele sistema geoquímico particular e desencadeia processos e reações internas em direção a uma nova condição de equilíbrio. A presença de uma substância química estranha ao ambiente original (migração de contaminantes), variações do pH (presença de substâncias ácidas/alcalinas), aumento da temperatura (decomposição do lixo), mudança no estado redox do meio (inundação/aeração, reversão das condições de drenagem, etc) e variação da concentração eletrolítica da solução intersticial (salinização/dessalinização) estão entre os principais fatores de desequilíbrio físico-químico do solo relacionados à disposição de resíduos e processos de contaminação por ação antropogênica em geral.

Estas mudanças, no solo, se refletem no seu arranjo estrutural e/ou na sua composição química e mineralógica, resultando em modificações das propriedades físico-químicas, com ênfase na permeabilidade.

Esta interação resulta, em relação ao contaminante, na sua transferência entre as fases do solo, principalmente do fluido intersticial para a fase sólida.

Também são importantes a alteração da forma química de ocorrência da espécie, a redução da concentração de moléculas livres na solução intersticial ou a variação da velocidade de avanço da espécie através do solo.

A importância prática dos processos de interação solo-contaminante reside na sua atuação nos processos de retardamento do avanço de frentes de contaminação.

Esta atuação se dá pela retenção de poluentes na fase líquida ou sólida dos solos, ou na atenuação dos seus efeitos poluentes, podendo-se monitorar as reações solo-contaminante e as modificações dos compostos ou espécies presentes.

A forma de avaliação, experimentalmente, da ocorrência ou não de interação entre o solo e uma solução percolante é realizada através da medição dos fluxos de massas percoladas no solo. Os seguintes casos podem ser observados:

- a) se a massa de determinada espécie diminuir entre a entrada e a saída de uma amostra de solo observada num permeâmetro, significa que o processo de interação é do tipo acumulativo onde esta espécie química migrou e ficou retida na fase sólida do solo por sorção (adsorção - fenômeno de superfície, ou absorção - retenção internamente nos grãos), ou então retida na fase líquida;

- b) se a massa traçante (aquela que está sendo monitorada) aumentar, poderá estar ocorrendo uma dessorção (liberação de íons presentes no solo para a fase líquida) por efeito da reatividade solo-contaminante;
- c) no caso do surgimento de novas espécies químicas não presentes inicialmente na solução percolante, poderá ter ocorrido uma alteração da composição química da espécie em questão, por interação de reatividade físico-química solo-contaminante.

Em Engenharia Ambiental a principal preocupação consiste em prever com razoável precisão o avanço com o tempo do contaminante através do solo. As espécies químicas se movem através dos poros interligados ou de caminhos preferenciais de percolação como trincas e fissuras, tanto sob gradientes hidráulicos (advecção) quanto sob gradientes de concentração química (difusão).

Conseqüentemente aqueles mecanismos de interação que representam a transferência da espécie da fase fluida (ar/água) para a fase sólida do solo são considerados “benéficos”, pois implicam em retardamento do avanço da espécie através do solo. Tais mecanismos são chamados de “processos acumulativos” por Yong et al (1992), pois resultam no acúmulo do contaminante no interior da massa de solo, que passa a funcionar como um “filtro”.

Quando ocorrem reações químicas no interior do solo em que a espécie sofre alterações da forma química perdendo ou reduzindo a sua toxicidade potencial, diz-se que houve um “processo de atenuação”. Tal efeito também é considerado benéfico do ponto de vista da Engenharia Ambiental. Muitas vezes essa terminologia é associada de forma genérica a todos aqueles mecanismos que resultam em redução da concentração da molécula livre do contaminante disponível para migração através dos poros do solo, o que incluiria os processos acumulativos citados anteriormente.

Alguns dos principais mecanismos de interação solo-contaminante são citados a seguir, associando-se a cada um o seu efeito provável no solo, na espécie química e no avanço da espécie através do solo:

### **1 - Reações de precipitação/solubilização (dissolução)**

A precipitação é uma reação química que ocorre em duas fases, a nucleação e o crescimento das partículas. Nesta reação forma-se uma nova substância, o que pode acontecer na superfície dos sólidos existentes ou na solução intersticial. Se a substância assim formada for insolúvel, precipita-se automaticamente na fase sólida.

Se for solúvel, só será transferida para a fase sólida na condição de supersaturação (concentrações elevadas).

Já a dissolução/solubilização refere-se à remoção de espécies químicas da fase sólida para a solução intersticial. Podem ser dissolvidos, por exemplo, agentes de ligação entre partículas de solo, ou elementos constituintes dos próprios argilominerais como Al, Fe e Si. Este processo libera partículas minerais ou de compostos químicos para migração através do solo e provoca erosão da estrutura dos argilominerais.

Estas reações estão diretamente relacionadas à concentração da espécie na solução intersticial (condições de subsaturação/supersaturação) e ao pH, que é um dos fatores de controle da solubilidade de espécies e compostos químicos.

A precipitação é um mecanismo particularmente importante nos casos de contaminação por metais pesados e metais de transição. Estes elementos tendem a reagir com os carbonatos formando compostos de baixa solubilidade e, conseqüentemente, sendo precipitados ou co-precipitados como carbonatos naturais. De modo geral, em pH alto os íons metálicos aquosos são hidrolisados, resultando na formação de hidróxidos metálicos que são em seguida precipitados na fase sólida.

#### 1.1 Efeito no solo:

- Por precipitação: a nucleação e o crescimento das partículas das espécies químicas e a conseqüente sorção pelo solo
- Por dissolução: a remoção de espécies mineralógicas para a solução intersticial.
- As reações são funções das concentrações das espécies na solução intersticial e do seu pH.

#### 1.2 Efeito na espécie química:

- Surgimento de novas espécies químicas.
- Se a nova substância for insolúvel, ocorrerá a sua retenção na superfície dos grãos do solo, e se for solúvel só irá para a fase sólida no caso de supersaturação.

#### 1.3 Efeito no avanço da espécie química:

- No caso de precipitação ocorrerá a retenção das espécies químicas com o conseqüente retardamento do seu avanço.
- Na solubilização/dissolução ocorrerá a tendência ao aumento do avanço da frente das espécies químicas.

**2 - Reações de oxi-redução** - São as reações de perda de elétrons (oxidação) e de ganho de elétrons (redução) pelas espécies químicas;

1.4 Efeito no solo:

- Como são reações muito lentas e influenciadas pelo potencial redox (Eh) do meio, resulta que, quanto mais baixo este potencial maior será a existência de espécies reduzidas (solo oxidado), e quanto mais alto for Eh, maior será a existência de espécies oxidadas (solo reduzido).

1.5 Efeito na espécie química:

- As espécies químicas tendem a ficar retidas pelo efeito das reações de oxi-redução, e o avanço será menor quanto mais reativo for o meio. No entanto, ao mudar de número de oxidação poderão formar novas substâncias e, desta forma, haver uma nova condição de mobilidade.

**3 - Reações ácido-base** - Refletem a transferência de prótons entre as espécies químicas: reação ácida resulta na liberação de íons hidrogênio  $H^+$ , na reação básica resulta na liberação de íons oxidrila  $OH^-$ .

- As reações ácido-base e as reações redox podem ser consideradas mais como representativas do “estado” do solo (pH/Eh) do que como reações químicas propriamente ditas. Dessa forma os mecanismos de interação solo-contaminante estariam relacionados às variações dos fatores pH e Eh. (Barbosa, 2001)

#### **4 - Complexação/quelação**

Reação química em que um cátion se combina por ligação covalente, coordenada a vários ânions ou moléculas. Formará um *complexo* quando os ligantes (ânions ou moléculas) possuírem apenas um átomo participando da reação, e *quelato* quando mais de um átomo do ligante participa da reação.

- A estabilidade dos complexos e quelatos formados é influenciada pelo pH do meio, e podem ser insolúveis (precipitação) ou solúveis. Neste caso, solúveis, o elemento complexado tem seu avanço através do solo facilitado pela diminuição da sorção.

#### **5 - Sorção/dessorção**

Sorção é o termo usado para designar todos os mecanismos que envolvem a transferência generalizada do soluto (íon ou molécula) da fase líquida para a superfície das partículas sólidas. As reações de sorção são geralmente reações de superfície e não implicam necessariamente na formação de novas substâncias.

Dessorção é o processo inverso de transferência da superfície das partículas sólidas para a fase líquida de uma substância sorvida anteriormente.

Os principais mecanismos de sorção no solo são:

- o **Adsorção física:** retenção de moléculas, átomos ou íons na superfície de um sólido ou líquido por forças de natureza eletrostática.
- o **Quimissorção:** processo de adsorção em que se formam ligações químicas entre as moléculas e uma superfície sólida. Estas ligações são mais fortes do que na adsorção física.
- o **Absorção:** processo que envolve a penetração da substância no corpo de um sólido ou líquido.
- o **Troca iônica:** processo em que os íons hidratados móveis de um sólido são trocados, equivalente a equivalente, por íons de mesma carga em solução. No solo predomina a troca catiônica, mas também pode ocorrer a troca aniônica, principalmente na presença de óxidos hidratados de Fe e Al. O pH determina a densidade de carga negativa na superfície das partículas sólidas e, conseqüentemente, influencia a CTC (capacidade de troca catiônica) do solo.

Como é difícil diferenciar na prática experimental estes mecanismos entre si, e da precipitação, usa-se o termo “sorção” para designar genericamente todos os mecanismos que resultam em transferência da espécie química da fase líquida para a fase sólida, e “dessorção” para designar o processo inverso.

## **6 - Processos microbiológicos**

Trata-se da ação de bactérias e microorganismos presentes no solo. Estes atuam principalmente como catalisadores de reações de oxi-redução e na transformação química de algumas substâncias. Processo importante em solos ricos em matéria orgânica e nas camadas mais superficiais dos solos em geral.

## **PERCOLAÇÃO NOS SOLOS**

Os fenômenos capilares, sabe-se da Física, são aqueles que surgem pelo contato dos líquidos com os sólidos e que resultam das ações moleculares. Assim se

denominam por terem sido originalmente observados nos tubos de diâmetro reduzidos, comparáveis aos diâmetros dos fios de cabelo (do latim *capillus*).

Nos solos, por capilaridade, a água se eleva por entre os interstícios de pequenas dimensões deixados pelas partículas sólidas, acima do nível do lençol freático. A altura alcançada depende da natureza do solo.

Microscopicamente, neste caso, observa-se que a distribuição da água intersticial pode ocorrer em três fases distintas, como por exemplo, nas argilas:

- a **água adsorvida** (água “presa” ou água “sólida”), cujas moléculas dipolares da água são orientadas e atraídas pelas cargas negativas do núcleo sólido do grão provocando pressões de até 20.000 atmosferas, mantendo-as firmemente presas à superfície do grão em camadas muito próxima a ela;
- a **água absorvida**, cujos dipolos-água já não estão tão orientados quanto a água presa, e que ficam distribuídos em distâncias ao grão de até 0,5 nm;
- e a **água livre**, com dipolos sem orientação privilegiada, e que é a que pode migrar sob a ação da gravidade.

Se a água contida no solo não estivesse sujeita a outra força além da gravidade, o solo acima do lençol d'água estaria perfeitamente seco. Na realidade, todo solo no campo está completamente saturado em uma certa altura acima do lençol d'água e parcialmente saturado acima desse nível. A água que ocupa os vazios do solo situado acima do lençol d'água constitui a umidade do solo.

Se a parte inferior de uma massa de solo seco fica em contato com água, a água sobe pelos vazios até uma certa altura acima da superfície da água livre. O fluxo ascensional no interior dos vazios do solo é atribuído à tensão superficial da água que está localizada no limite entre o ar e a água. Dentro da zona limite a água está em um estado de tensão comparável à de uma membrana de borracha distendida ligada às paredes dos vazios do solo. Entretanto, ao contrário da tensão em uma membrana distendida, a tensão superficial na película de água limite é inteiramente insensível seja à contração, seja à distensão da película. Os conceitos referentes à interação molecular que produz a tensão superficial são ainda controvertidos. Não obstante, a existência de uma tensão de tração na superfície da película foi confirmada, fora de qualquer dúvida, há mais de um século, e a intensidade dessa tensão tem sido, desde então, determinada por métodos muito diferentes com resultados compatíveis.

Os fenômenos capilares são muito importantes na construção de pavimentos rodoviários, assim como a contração dos solos é também explicada pelos fenômenos capilares. À medida que a umidade do solo vai sendo evaporada, vão se formando meniscos entre os grãos e, conseqüentemente, irão surgindo forças capilares, que aproximam as partículas provocando as fissuras e rachaduras no solo.

A coesão aparente da areia úmida, que permite converter uma praia, por exemplo, numa pista para automóveis, assim como se manter firme em taludes muito inclinados, representa uma outra implicação de engenharia de solos.

Um outro efeito muito importante pode ser observado em barragens de terra, que é o sifonamento capilar. Consiste na percolação da água sobre o núcleo dito impermeável da barragem, tal fato ocorrendo quando a altura capilar do material que cobre o núcleo impermeabilizante é maior que a distância entre a crista do núcleo e o nível d'água de montante.

### **ESTABILIDADE DE ATERROS DE RSU**

As análises técnicas de engenharia de aterros sanitários, com enfoque principal na geotecnia, são mais complexas do que aquelas da estrutura clássica de solos. Isto é resultante das dificuldades envolvidas na avaliação das propriedades físicas e mecânicas do lixo, assim como das interfaces de comportamento entre os resíduos, solos de fundação e cobertura, e a variação desses parâmetros com a profundidade.

Além disso, devem ser considerados nas análises a variação das propriedades do lixo com o tempo e as condições de contorno das superfícies potenciais de ruptura desses maciços.

O conhecimento das propriedades geomecânicas de maciços sanitários, em particular as suas características de compressibilidade e de estabilidade, ocupam importante papel no gerenciamento de resíduos, à medida que locais disponíveis para implantação de aterros sanitários vão se tornando cada vez mais escassos, sobretudo nas grandes cidades.

A estabilidade de aterros sanitários é analisada de modo semelhante a problemas geotécnicos tradicionais de taludes, sendo que a ruptura pode ocorrer no solo de fundação, na massa de RSU, na cobertura do aterro sanitário ou em interfaces.

Considera-se que os aterros sanitários municipais modernos geralmente possuem dois tipos de configurações:

- Pilha de resíduos sobre superfície existente de um terreno;
- Aterro em uma área escavada ou vale.

Desta forma alguns modos potenciais de ruptura em aterros sanitários observados são os seguintes:

- Ruptura de base e talude;
- Arrancamento dos componentes do sistema de isolamento da trincheira de ancoragem;
- Ruptura através da massa de resíduos;
- Ruptura através da massa de resíduos, *liner* e fundação;
- Ruptura por escorregamento ao longo do sistema de isolamento (*liner*);

Os principais fatores que regem a análise de estabilidade em aterros sanitários são:

- Propriedades do solo de fundação;
- Resistência ao cisalhamento e peso específico dos RSU;
- Geometria do talude;
- Nível do lixiviado e seu padrão de fluxo dentro do aterro;
- Tipo de cobertura;
- Resistência da cobertura à erosão.

No caso de rupturas em interfaces também é um fator importante a resistência ao cisalhamento ao longo do contato destas interfaces.

Dos fatores apresentados o peso específico e a resistência ao cisalhamento dos RSU são as características de mais difícil determinação, pois são diretamente dependentes da idade dos resíduos e da sua composição inicial, a qual varia muito de comunidade para comunidade. Portanto, sua determinação depende de investigações locais específicas para o depósito.

### **SISTEMAS DE DRENAGEM E COLETA DE EFLUENTES**

Um sistema de coleta de efluentes tem a função básica de diminuir a altura da carga hidráulica sobre a barreira de contenção, seja de fundo ou cobertura e, conseqüentemente, diminuir a advecção através da barreira construída.

O aterro sanitário é um dos principais métodos para a disposição de rejeitos e seu perfeito funcionamento depende muito do sistema de coleta de efluentes projetado e executado.

Esta dependência é de segurança, pelo monitoramento exigido dos parâmetros dos efluentes gerados, como operacional do sistema de contenção, através da perfeita condução hidráulica dos efluentes gerados evitando-se efeitos colaterais perigosos no sistema, tais como alterações físico-químicas, de pressões e de cargas nas barreiras construídas.

O conceito de aterro sanitário deve ser entendido como o local onde os resíduos devem ser purificados, minimizando o impacto negativo ao meio ambiente. Esta concepção moderna de aterros sanitários decorre de aspectos como a não-disponibilidade de áreas, aumento dos volumes e preocupação ambiental crescente.

Para os aterros sanitários só deverão seguir aqueles resíduos que já tiveram esgotada a possibilidade de aproveitamento, reciclagem ou de tratamento. Estes serão os materiais considerados como “resíduos últimos”, denominação decorrente de políticas de resíduos sólidos instituídas em países como a França que seguem exatamente esta concepção.

Um sistema de coleta de efluentes aplicado, por exemplo, a um aterro sanitário, estará sujeito a bloqueios do sistema de drenagem, à colmatação das tubulações e drenos por partículas de solo, precipitação química ou filmes de micro-organismos. Como forma de minimizar/evitar estes efeitos procura-se maximizar a velocidade de fluxo dos efluentes assim como a utilização de materiais com granulometria graduada e adequada à situação.

Todos os parâmetros e variáveis envolvidos nos projetos dos sistemas de disposição de resíduos, e que se referem principalmente aos sistemas de drenagem e coleta de efluentes, serão considerados para a escolha do tipo de sistema a utilizar. Basicamente são quatro tipos de sistemas utilizados:

- **Drenagem por tubulação:** sistema que utiliza tubos especiais de PVC com diâmetro aproximado de 250 mm com furação adequada ao tipo de coleta desejada, e que são dispostos no fundo de calhas ou em camadas de drenagem de cobertura. Este tipo é o mais usual e permite condução rápida do efluente drenado. No entanto está sujeito à colmatação e se faz necessária a utilização de filmes de geotêxtil envolvendo os tubos.
- **Drenagem por drenos de pedregulhos:** utilização de pedregulhos ao invés de tubos. Este sistema possui as mesmas vantagens do sistema com tubulações, além de ser de menor custo, mas no entanto também está sujeito aos mesmos problemas de colmatação e necessidade de filtros de geotêxteis.

- **Filtração com uso de solo:** O uso de solo com a granulometria de areias é de uso tradicional, mas sujeito aos problemas de colmatção;
- **Filtração com o uso de geotêxtil:** A utilização de geotêxteis é uma tecnologia relativamente nova, e tem como grande vantagem a economia de espaço, uma vez que são utilizados filmes de pequena espessura.

Um sistema de drenagem é composto de uma camada drenante de altura máxima de 30 cm formada por pedregulhos com granulometria crescente no sentido do fluxo, e que filtra e conduz para tubos ou drenos o efluente a ser coletado.

Existem sistemas drenantes para coberturas e para fundo de barreiras de rejeitos. O principal parâmetro operacional de um sistema de drenagem é a carga hidráulica ( $h$ ) a que está sujeita a barreira. O projeto do sistema é baseado de forma a que a carga hidráulica máxima ( $h_{máx}$ ) esteja sempre contida na camada de drenagem. Caso isto não ocorra é necessário que sejam redimensionados alguns dos outros parâmetros físicos do sistema projetado de maneira que a carga hidráulica se enquadre nesta premissa. Isto é necessário devido a que se tem controle das condições de permeabilidade e características físico-químicas da camada de drenagem projetada e não da massa de rejeitos.

Os parâmetros principais de um sistema de drenagem são:

- ❑ O coeficiente de permeabilidade da camada drenante ( $k$ , em cm/s);
- ❑ A inclinação da base da camada de drenagem, em relação ao eixo da tubulação ou dreno ( $S_1$ , em %);
- ❑ A taxa de entrada de efluente no sistema ( $r$ , em mm/dia);
- ❑ A inclinação da tubulação ou dreno, em relação ao ponto de coleta ( $S_2$ , em %);

Num projeto de sistema de drenagem, ao se observar que a carga hidráulica resultante sobre a barreira é maior do que 30 cm se deve, para garantir as condições ótimas de drenagem, diminuí-la, variando um ou mais de um dos parâmetros principais da seguinte forma:

- ❑ Aumentar a inclinação da barreira de fundo da camada de drenagem ( $S$ );
- ❑ Diminuir a taxa de entrada de efluente na camada drenante ( $r$ ) através da previsão de uma carga de efluente menor;
- ❑ Aumentar a permeabilidade da camada de drenagem ( $k$ );
- ❑ Diminuir o comprimento da barreira de fundo da camada de drenagem ( $L$ ), redimensionar a conformação do fundo da barreira:

Um sistema de drenagem e tratamento para aterros sanitários é composto de:

- ✓ **Sistema de drenagem de águas pluviais:** Tem a finalidade de interceptar e desviar o escoamento superficial das águas pluviais, durante e após a vida útil do aterro, evitando sua infiltração na massa de resíduo.
- ✓ **Sistema de drenagem de líquidos percolados:** Este sistema deve coletar e conduzir o líquido percolado, reduzindo as pressões destes sobre a massa de lixo e, também, minimizar o potencial de migração para o subsolo. Outro motivo para se drenar o percolado é impedir que ele ataque as estruturas do aterro (camada de impermeabilização de base, por exemplo).
- ✓ **Sistema de drenagem de biogás:** Este sistema tem a função de drenar os gases provenientes da decomposição da matéria orgânica, evitando sua migração através dos meios porosos que constituem o subsolo, quando poderiam se acumular em redes de esgoto, fossas, poços e sob edificações (internas e externas ao aterro sanitário). Também, e muito importante, diminuir as pressões internas nos aterros de resíduos, e controlar as emissões para a atmosfera.

Atualmente os processos de drenagem e tratamento de biogás apresentam aspectos muito importantes devido à recente aprovação e colocação em vigor do Protocolo de Quioto, acordo internacional patrocinado pela ONU, firmado em 1997 por 59 países, na cidade de Quioto, no Japão. Este protocolo inscreve-se no âmbito da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima, tendo por objetivo reduzir as emissões de gases de efeito estufa em nações industrializadas por meio de metas que correspondem, em média, à redução de 5% sobre o montante emitido pelo país em 1990, e estabelecer modelo de desenvolvimento limpo para países emergentes. O metano e o dióxido de carbono, principais componentes do biogás gerado em aterros de lixo, são dois dos gases de efeito estufa regulados pelo protocolo.

- ✓ **Sistema de tratamento dos líquidos percolados:** Este sistema destina-se à coleta e tratamento dos líquidos percolados de forma a não permitir a sua descarga em cursos de água fora dos padrões exigidos. Os processos de tratamento atualmente empregados são: recirculação ou irrigação; tratamento em lagoas de estabilização; tratamentos químicos; tratamento por filtros biológicos e tratamento em estações de tratamento de esgotos. A escolha do melhor processo e o seu dimensionamento dependem das

características do percolado, e este da alternativa de tratamento dos resíduos adotada para o aterro sanitário analisado.

- ✓ **Sistema de tratamento de gases:** O sistema mais usual tem sido a queima do biogás proveniente do aterro nos próprios drenos coletores dos gases. Porém é um sistema com danos ambientais em vista de também contribuir para o aumento da quantidade de gases de efeito estufa na atmosfera. Este efeito, atualmente combatido em escala global conforme acima descrito, continua ocorrendo uma vez que apesar de converter o metano em dióxido de carbono e reduzir em vinte e uma vezes a sua influência no aquecimento global, continua a emissão de gases. O mais adequado seria a coleta do gás metano, sua purificação e utilização como fonte energética alternativa. No entanto, considerando que na maioria dos casos brasileiros, por prevalecer a quantidade de aterros de pequeno porte no que se refere à sua capacidade de geração de biogás para fins de aproveitamento energético, a melhor situação é a utilização de aterros com uma adequada camada de solos de cobertura, com o uso desses solos aplicados com técnicas adequadas de engenharia, permitindo que se minimize os efeitos dos gases produzidos nos aterros pela atuação dessas camadas argilosas na oxidação do metano produzido, reduzindo o seu potencial de impactação no aquecimento global assim como, evidentemente, nos riscos ambientais para o entorno dessas áreas.
- ✓ **Sistema de monitorização:** A monitorização pressupõe o acompanhamento da evolução de um determinado processo, obtendo-se subsídios para a realização de alterações neste. O sistema de monitorização tem a função de permitir a detecção, em estágio inicial, dos impactos ambientais negativos causados pelo empreendimento, permitindo a implementação de medidas mitigadoras antes que estes assumam grandes proporções e, dessa forma, torne-se mais difícil sua correção. O principal sistema de controle ambiental refere-se ao acompanhamento dos líquidos percolados, sendo monitorizados os mananciais de águas superficiais e subterrâneas. De um modo geral a monitorização de um aterro sanitário envolverá aspectos geotécnicos e ambientais.

O sistema de monitorização geotécnica consiste de:

- Controle de deslocamentos horizontais e verticais;
- Controle do nível de percolado e pressão de biogás no corpo do aterro;

- ❑ Controle da descarga de percolado através dos drenos;
- ❑ Inspeções periódicas, buscando-se indícios de erosão e trincas, entre outros problemas;

O sistema de monitorização ambiental consiste de:

- ❑ Controle da poluição do solo;
- ❑ Controle da qualidade das águas subterrâneas;
- ❑ Controle da qualidade das águas superficiais;
- ❑ Controle da qualidade do ar;
- ❑ Controle de insetos e vetores de doenças.
- ❑ Controle de ruído e vibração;
- ❑ Controle de poeira e material esvoaçante;
- ❑ Controle de impactos visuais negativos.

A monitorização deverá ser efetuada com a instalação de poços, piezômetros, medidores de deslocamentos horizontais e verticais, medidores de vazão, análises físico-químicas e biológicas e inspeções diversas.

A frequência da coleta de amostras e das medições *in situ*, a escolha dos parâmetros a analisar ou medir, as técnicas e os métodos a utilizar, assim como a frequência de apresentação dos resultados deve ser discutida e constar no projeto.

## 2.1.6 IMPACTOS POTENCIAIS

Apresentamos a seguir um resumo, obtido com base na consulta e observação de vários trabalhos envolvendo análise de riscos ambientais e à saúde humana, com indicação das probabilidades de ocorrência de acidentes em decorrência da presença de um aterro de resíduos sólidos urbanos.

**Tabela 1 - Probabilidades de ocorrência de acidentes decorrentes de um aterro de resíduos - Riscos à saúde humana e ambientais (Pivato, A., 2003)**

Probabilidade da ocorrência de acidentes decorrentes de um aterro de resíduos - Riscos Ambientais						
Meio de contaminação	evento principal	contaminante	evento	probabilidade de ocorrência de um acidente		
				durante a operação do aterro (20 anos)	pós fechamento do aterro (do 21 até ano 50)	longo período (após ano 50)
gasoso	fluxo de biogás	biogás	concentração perigosa de contaminantes	3	2	0
			inibição do crescimento da vegetação	3	2	0
			inibição do crescimento animal	2	1	0
líquido	fluxo de percolados	contaminação da água subterrânea	exceder as concentrações limites	3	3	2
		contaminação da água de superfície	exceder as concentrações limites	2	2	2
			inibição do crescimento da vegetação	2	2	2
			inibição do crescimento animal	1	1	1
sólido	solos	solos contaminados	exceder as concentrações limites	0	2	3
			inibição do crescimento da vegetação	1	1	3
			inibição do crescimento animal	1	1	3

**legenda:** (3) - muito provável; (2) - provável; (1) - pouco provável; (0) - não constitui perigo

Probabilidade da ocorrência de acidentes decorrentes de um aterro de resíduos - Riscos à Saúde Humana						
Meio de contaminação	evento principal	contaminante	evento	probabilidade de ocorrência de um acidente		
				durante a operação do aterro (20 anos)	pós fechamento do aterro (do 21 até ano 50)	longo período (após ano 50)
gasoso	fluxo de biogás	biogás	inalação de gás no interior das residências	3	2	0
			inalação de gás no exterior das residências	3	2	0
		poeiras	inalação de poeiras no interior das residências	2	1	0
			inalação de poeiras no exterior das residências	2	1	0
líquido	fluxo de percolados	contaminação da água subterrânea	ingestão de água subterrânea contaminada	3	3	2
			contato dérmico com água subterrânea contaminada (durante banhos)	3	3	2
			inalação de vapores d'água contaminada no exterior das residências	3	3	2
			inalação de vapores d'água contaminada no interior das residências	3	3	2
			ingestão de vegetais irrigados com água contaminada	2	2	1
			ingestão de água de irrigação	2	2	1
			contato dérmico com água de irrigação contaminada	1	1	1
		contaminação da água de superfície	inalação de sprays de água de irrigação contaminada	0	0	0
			ingestão de água de superfície (ex.: durante natação)	1	1	1
			contato dérmico com água de superfície	1	1	1
			ingestão de vegetais irrigados com água contaminada	2	2	1
			ingestão de água de irrigação	1	1	1
			contato dérmico com água de irrigação contaminada	1	1	1
			inalação de sprays de água de irrigação contaminada	0	0	0
sólido	solos	solos contaminados	contato dérmico com solos contaminados	1	1	3
			ingestão de solos contaminados	0	1	2
			ingestão de vegetais plantados em solos contaminados	1	1	3
			risco microbiológico	1	0	0
		vapores contaminados	inalação de vapores contaminados no exterior das residências	1	1	1
			inalação de vapores contaminados no interior das residências	1	1	1

**legenda:** (3) - muito provável; (2) - provável; (1) - pouco provável; (0) - não constitui perigo

## **INVESTIGAÇÃO E REMEDIAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS**

São apresentados a seguir apreciações e comentários enfocando investigação ambiental, com maior ênfase na investigação geoambiental. Procura-se objetivar e sintetizar aqueles aspectos considerados mais relevantes no que se refere aos procedimentos básicos de uma investigação de áreas impactadas ou degradadas.

Os principais tópicos utilizados para isso são:

- Planejamento (métodos diretos & indiretos; levantamentos preliminares)
- Levantamentos físicos (geologia/geotecnia/hidrogeologia – estratigrafia)
- Tipos de contaminantes e métodos de análise, cuidados nas amostragens.
- Métodos de investigação usados e seus resultados.

O processo de remediação daí decorrente inclui várias etapas, dentre elas destacam-se:

Implantação de poços de monitoramento; determinação dos perfis litoestratigráficos; monitoramento contínuo de dados; realização de ensaios de permeabilidade; execução de paredes diafragma; construção de poços de extração de águas contaminadas e seu tratamento; modelagem numérica tridimensional de fluxos; estudos para definição de técnicas otimizadas para o aceleração da remoção dos contaminantes; e monitoramento biológico da região, etc.

A investigação, sistema de monitoramento e a análise de estabilidade de um aterro de RSU, procuram demonstrar vários aspectos relevantes na área de investigação ambiental mas, com maior ênfase, destacam os aspectos ligados à administração de resíduos sólidos municipais, à imprevidência dos governantes, e a uma preocupação maior para o “como” se livrar do lixo, simplesmente.

Quanto às considerações a respeito da estabilidade dos aterros de resíduos, vários fatores devem ser analisados, tais como:

- a geologia do local,
- o sistema de impermeabilização existente,
- a extração de gases,
- condições de drenagem.

Quanto às condições de drenagem existe uma maior preocupação em vista da grande influência da geração de percolados e lixiviados na estabilidade dos aterros. É dada ênfase nos parâmetros de intercepto coesivo e ângulo de atrito da massa de lixo, assim como a sua influência no estado de tensões atuantes nos maciços, e nos fatores de segurança considerados para estes casos.

Os trabalhos a serem realizados no local dos aterros consistem na execução de furos de sondagem e monitoramento com a utilização de piezômetros e monitoramento de biogás gerado.

## 2.2 ANÁLISE DE RISCO

Dentro do escopo da revisão bibliográfica e com o objetivo de fundamentar o desenvolvimento das considerações relacionadas ao tema RSU nessa dissertação, apresenta-se a seguir a conceituação de perigo e risco, avaliação de exposição, toxicidade, caracterização de riscos e sua quantificação.

### 2.2.1 RISCO

É apresentada a seguir uma abordagem cujo propósito é o entendimento do que é risco, como analisá-lo num sítio específico e o que as estimativas do risco representam.

Risco ambiental é a caracterização do potencial dos efeitos adversos à saúde humana decorrente da exposição a fontes de perigos ambientais. A análise e a avaliação de risco ambiental também inclui caracterização das incertezas inerentes ao processo de inferência de risco.

No entendimento clássico, risco pode ser definido como a probabilidade de ocorrer perda ou dano. Quando o resultado é mensurável, por exemplo, fatalidades por acidentes, o risco pode ser calculado a partir do produto da probabilidade de uma ocorrência pela severidade dos danos por ela provocados.

$$\text{Risco} = (\text{probabilidade}) \times (\text{severidade da consequência})$$

Usando-se o cálculo sugerido para atividades diferentes poderá resultar no mesmo valor de risco ao final. Ou seja, duas atividades diferentes podem apresentar o mesmo risco apesar da severidade dos danos de uma ser superior ao da outra, pois a probabilidade de ocorrerem é diferente, como exemplificado a seguir.

Atividade	Severidade do resultado	Probabilidade da ocorrência	Risco resultante
1	20	0,1	2
2	10	0,2	2

Os termos risco e perigo são freqüentemente confundidos. Perigo é um termo descritivo, referindo-se à capacidade intrínseca de um material, considerado aqui como

a fonte de perigo, causar um dano. Portanto no caso em questão, nessa dissertação, os resíduos - RSU - se constituem na fonte de perigo.

O perigo associado a um resíduo é função de variáveis tais como sua toxicidade, mobilidade e persistência, assim como da forma como é disposto, armazenado e/ou contido. O efluente (emissões) ou efluente tratado decorrente de resíduos perigosos representa portanto um perigo. No entanto, o resíduo, fonte de perigo, não representará um risco sem que tenha ocorrido, ou exista a possibilidade de ocorrer, uma exposição a essa fonte.

Uma metodologia de avaliação quantitativa de risco descreve o processo de uso de princípios científicos para quantificar as estimativas de um risco. São utilizadas quatro etapas principais no processo:

- 1) Identificação do perigo (quais substâncias químicas são importantes)
- 2) Avaliação da exposição e do receptor (para onde as substâncias químicas vão, quem estará exposto, e como)
- 3) Avaliação da toxicidade (determinação de índices de toxicidade, para computação de risco)
- 4) Caracterização do risco (estimativa da magnitude do risco, e das incertezas da estimativa).

No campo dos resíduos perigosos, a avaliação de risco fornece informações relevantes para a tomada de decisões tais como estimar as conseqüências de possíveis exposições. Dentre as principais decisões que poderão ser tomadas a partir das estimativas incluem-se:

- a seleção das opções de tratamento e disposição de resíduos;
- a remediação de sítios contaminados;
- a minimização da geração de resíduos;
- melhorias nos sítios de resíduos com novos equipamentos e sistemas;
- desenvolvimento de novos produtos, etc.

É conveniente enfatizar que as estimativas de risco são subsídios técnicos num processo de análise e avaliação, e que a tomada de decisão sobre resíduos perigosos freqüentemente deve contemplar também fatores políticos, sociais e econômicos, dentre os principais.

Avaliação de risco requer uma clara identificação de quais substâncias químicas estão presentes no sítio, suas concentrações e distribuição espacial, e como elas podem ser transportadas no meio ambiente, do sítio até os potenciais receptores.

As substâncias químicas de interesse são selecionadas com base em critérios que melhor representem o risco contido no sítio, ou seja:

- Os mais tóxicos, persistentes, e móveis;
- Os predominantes em termos da distribuição espacial e concentração;
- Aqueles envolvidos nas mais significativas exposições;

Para a elaboração de uma avaliação de risco é necessário dispor de várias informações, destacando-se:

1. Histórico do sítio
2. Níveis dos contaminantes nos meios:
  - 2.1 ar;
  - 2.2 água subterrânea;
  - 2.3 água superficial;
  - 2.4 solos e sedimentos;
3. Características ambientais que influenciam a disposição química e o seu transporte;
  - 3.1 Geológicas
  - 3.2 Hidrogeológicas
  - 3.3 Atmosféricas
  - 3.4 Topográficas
4. População potencialmente afetada
5. Biota potencialmente afetada

Apresentamos a seguir os principais tópicos para uma avaliação inicial de risco ambiental:

1. Dados de contaminação por meio analisado (água subterrânea, solo, etc.) para ambos os tipos de contaminantes, carcinogênicos e não-carcinogênicos;
2. Tabulação para cada substância química detectada, dos valores das taxas de concentração observadas no sítio;

3. Identificação das doses de referência para não-carcinogênicos e fatores de tendência para carcinogênicos para cada via potencial de exposição;
4. Determinação dos resultados de toxicidade para cada substância química em cada meio.

4.1 Para não-carcinogênicos:

$$ET = C_{max} / RfD$$

ET = escore de toxicidade

C<sub>max</sub> = concentração máxima

RfD = dose crônica de referencia (ou seja, uma estimativa de absorção diária aceitável)

4.2 Para carcinogênicos:

$$ET = SF \times C_{max}$$

SF = "slope factor" (fator de tendência) – fator de potencial carcinogênico

5. Hierarquizar os compostos químicos conforme seus graus de toxicidade para cada via de exposição;
6. Selecionar aquelas substâncias que representem 99% do escore total, para cada via de exposição;

Ainda que a lista das substâncias de interesse abranjam 99% do risco estimado, elas podem representar menos do que 10% das substâncias detectadas. Não é raro reduzir um total de 100 substâncias detectadas para 10 a 15 selecionadas como de interesse para o estudo.

## 2.2.2 EXPOSIÇÃO

O segundo estágio de uma avaliação quantitativa de risco consiste em estimar a exposição aos contaminantes das populações potencialmente em risco.

### CAMINHOS DE EXPOSIÇÕES AMBIENTAIS

O principal nesse estágio é a análise da forma de disposição e dos mecanismos de transporte dos contaminantes.

Apresenta-se a seguir um exemplo dos principais elementos que devem ser considerados num estudo de avaliação de risco:

1. Fonte: lagoa de resíduos;
2. Mecanismos de interação com os contaminantes:

- 2.1 Químico de emissão: lixiviação;
- 2.2 Transporte: fluxo de água subterrânea;
- 2.3 Transferência: sorção;
- 2.4 Transformação: biodegradação;
3. Ponto de exposição: poços de captação de água para uso domiciliar;
4. Receptores: consumidores residenciais de água potável;
5. Via de exposição: ingestão;

## **POPULAÇÕES POTENCIALMENTE EXPOSTAS**

A próxima etapa consiste da avaliação da exposição, ou seja, determinar a população potencialmente exposta, o que no mínimo exigirá o seguinte:

1. Levantamento da atual população nas vizinhanças do lugar;
2. Estimativa da futura população na vizinhança;
3. Levantamento da população pertencente a grupos sensíveis: (por exemplo, a população infantil, que é altamente sensível a contaminações por metais pesados, como o chumbo);
4. Levantamento dos trabalhadores potencialmente expostos;

A população atual pode ser inicialmente identificada e agrupada, em função de sua distância aos limites do lugar, por exemplo de 1 a 3 km. No entanto, qualquer distância deve ser estabelecida com base nos resultados da análise de transporte e destino. A determinação da população potencialmente exposta deve se basear no uso do solo e em fontes de referência documentadas para a obtenção de dados demográficos. A seguir apresentam-se algumas das fontes de informação demográfica que podem ser usadas:

- Mapas topográficos
- Mapa de impostos
- Relatórios do censo
- Estudos demográficos regionais/ municipais
- Mapas do zoneamento municipal
- Dados de uso do solo
- Mapas de uso futuro do solo
- Visita ao local

- Padrão de atividades humanas
- Fotos aéreas

Após a avaliação preliminar da documentação disponível, uma visita ao local é fundamental para avaliar a gravidade da situação. É preciso levantar as atividades humanas associadas ao uso do solo, visando identificar:

- Instalações que concentrem grupos populacionais sujeitos a maior risco, destacando-se como exemplo, hospitais, escolas e creches;
- Instalações para atividades ao ar livre, tais como parques temáticos, quadras de esporte, parques infantis e clubes;
- Tempo que as populações mais sensíveis ficam expostas à área potencialmente contaminada;
- Mudanças previsíveis nas atividades locais, sejam elas sazonais ou ainda as já previstas no curto e médio prazo;
- Possibilidade de exposições secundárias, isto é, exposições indiretas tais como a de atividades agrícolas nas vizinhanças.

Certos grupos populacionais podem exigir atenção especial devido à sua alta sensibilidade a substâncias tóxicas, tais como as crianças, gestantes, idosos e pessoas portadoras de doenças crônicas. O estágio inicial de identificação desses grupos populacionais é a localização das instalações em que eles se concentram, como escolas e creches, por exemplo. Um aspecto crítico é estimar as populações futuras, para avaliar como as mudanças poderiam afetar as estimativas de risco. Por exemplo, se as águas subterrâneas hoje não podem ser ingeridas mas poderão o ser no futuro, isso modificaria os cálculos de risco no futuro.

## **DESENVOLVIMENTO DE CENÁRIOS DE EXPOSIÇÃO**

Depois de definidas as vias de exposição e identificada a população potencialmente exposta, a próxima etapa é caracterizar em que condições as populações estarão potencialmente expostas. A etapa envolve uma avaliação tanto do uso do solo atualmente como no futuro próximo (curto e médio prazo) para estabelecer um conjunto de condições possíveis para a ocorrência da exposição. Uma vez estabelecidos os cenários, é preciso selecionar os parâmetros específicos que controlarão a exposição, como a frequência e a duração da exposição, bem como a dose absorvida diariamente.

Alguns dos cenários mais comuns são descritos brevemente a seguir, onde se apresentam também questões específicas que precisam ser consideradas caso a caso:

Cenário de uso industrial – Se o local está sendo utilizado para atividades industriais, é preciso avaliar a possível exposição dos trabalhadores aos contaminantes.

- Em condições normais de trabalho, os trabalhadores estão expostos aos contaminantes?
- Os trabalhadores poderiam ser expostos no futuro, seja devido a mudanças do layout interno ou em decorrência de atividades de remediação?

Os trabalhadores regularmente estão protegidos pelas normas de segurança de trabalho. As estimativas dos seus riscos potenciais normalmente são feitas mediante uma avaliação hipotética para determinar se existe a possibilidade de riscos inaceitáveis, mais para assegurar que os trabalhadores não estão sujeitos a riscos durante o curso normal de suas atividades.

#### Cenário de pessoas passando pelo sítio

- Existem evidências de que pode ocorrer passagem de transeuntes regularmente pelo local?
- Existe uma cerca que possa limitar o acesso ao local? Caso positivo, a cerca está em boas condições?
- O local é próximo a escolas, shopping, ou áreas residenciais onde crianças poderiam ter razões ou tendência a brincar?

#### Cenário residencial

- Existem pessoas residindo no local?
- Poderá ou poderia ser convertido em área residencial no futuro?
- Existe algum zoneamento ou legislação que poderia limitar o seu uso futuro para fins residenciais?
- As residências são unidades unifamiliares?
- Existe alguma possibilidade das residências usarem a água subterrânea?

Um cenário residencial é freqüentemente avaliado mediante uma situação hipotética que visa estimar o pior caso de risco. A exposição nesse cenário é geralmente a condição mais restritiva para grupos de qualquer faixa etária, o que resulta em maiores potenciais de exposição e riscos potenciais mais altos.

### Cenário de uso recreativo

Esse cenário é particularmente aplicável para a avaliação dos riscos potenciais associados a corpos d'água de superfície onde a população pode pescar, nadar, usar canoagem, etc. Visitas feitas ao local podem ser úteis no desenvolvimento do cenário de exposição recreativa. Também é importante confirmar o uso regulamentado e a classificação do corpo d'água com as agências federais, estaduais e municipais pertinentes.

### Cenário de construções no/ ou próximo ao sítio

- Estão planejadas atividades de construção no sítio?
- A construção poderá resultar em exposição potencial tanto para os receptores por *contato direto*, como os trabalhadores da construção civil, como para a população indiretamente devido a poeiras e gases voláteis liberados durante as atividades de movimentação de terra?

A elaboração de cenários requer que sejam assumidas algumas premissas, o que pode requerer decisões subjetivas. Idealmente, devem ser produzidos cenários plausíveis para assegurar avaliações de risco conservadoras. No caso de alguns sítios de resíduos tóxicos, cenários irrealistas têm sido usados.

Pontos de Exposição: define a localização dos receptores para vários cenários. Eles são identificados em cada cenário de exposição simplesmente pela sobreposição da informação demográfica com as rotas de exposição. Um ponto de exposição pode estar bem próximo à fonte de contaminação propriamente dita, como é o caso do cenário de transeuntes em um sítio, ou ainda, a uma distância considerável, em especial nas vias que envolvem a cadeia alimentar.

## **CONCENTRAÇÃO DOS CONTAMINANTES NO PONTO DE EXPOSIÇÃO**

Nessa etapa, o analista de risco deve estimar a concentração dos contaminantes nos pontos de exposição, o que deve incluir todos os caminhos de exposição – aéreo, hídrico, inclusive os das águas subterrâneas, os solos, sedimentos e alimentos. No caso de avaliações no presente, dados atualizados de monitorização devem ser usados sempre que possível. Por exemplo, a concentração de contaminantes pode ser obtida de poços de água potável nas vizinhanças do sítio.

Para avaliações de condições futuras o quadro é bem diferente e mais rigoroso. Uma pluma de contaminação pode ainda não ter migrado para um ponto de exposição potencial. A remediação poderá então reduzir a migração drasticamente se for realizada rapidamente.

Em uma avaliação de risco abrangente as concentrações de exposição para cada alternativa de remediação devem ser estimadas incluindo-se as condições atuais (condições da linha de base ou da opção de não remediação). Determinar a futura concentração de um contaminante num ponto de exposição sempre exigirá o uso de métodos de modelagem para transporte e destino dos contaminantes, e referências. O maior problema desses modelos é a calibração. Uma vez calibrado, avaliações sucessivas devem ser realizadas para estimar as concentrações para uma gama de condições e premissas.

#### **Doses de exposição para os receptores:**

São as doses estimadas de contaminação a que os receptores estão potencialmente expostos, nos pontos de exposição, dos diferentes contaminantes de interesse do estudo que se realiza.

#### **Avaliação de toxicidade:**

Este estágio do processo de avaliação de risco define a toxicidade, isto é, o relacionamento dose-resposta para cada contaminante de interesse do estudo e as comparações necessárias, como por exemplo:

- Carcinogênicos versus não-carcinogênicos;
- Fontes de dados toxicológicos;
- Fatores de tendência para carcinogênicos;
- Doses de referência para não-carcinogênicos;

## **2.3 GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS DE RESÍDUOS**

Serão apresentados a seguir os tópicos mais diretamente relacionados com a geração, emissão e atenuação dos gases produzidos em aterros de resíduos sólidos urbanos.

### **2.3.1 GERAÇÃO E COMPOSIÇÃO**

Considerando que a maior parte da massa dos resíduos sólidos é constituída por matéria orgânica, resulta que os processos microbiológicos governam o processo de geração do gás. Mas além destes a geração também é resultado de processos físicos e químicos.

Esses processos são sensíveis às condições ambientais que afetarão a população microbológica e, dessa forma, a taxa de produção do biogás.

A composição do resíduo é o fator mais importante na avaliação do potencial de geração de biogás de um sítio de disposição de resíduos. O volume potencial máximo de biogás é dependente da quantidade e do tipo de conteúdo orgânico dentro da massa de lixo uma vez que os resíduos orgânicos em decomposição são a fonte de todo o biogás produzido.

Outros fatores que influenciam a taxa de produção são:

- teor de umidade da massa;
- conteúdo de nutrientes;
- conteúdo de bactérias;
- nível de pH;
- temperatura da massa e do ambiente;
- pressão atmosférica;
- planos de operação e projeto específicos do local.

A umidade é o fator limitante primordial na taxa de decomposição de resíduo. As condições de umidade dentro do aterro são função de muitos fatores. Dentre eles destaca-se que os aterros são tipicamente construídos e enchidos em padrão de camada seqüencial. Este fator é importante na compreensão de como a umidade se move para dentro e através do resíduo. O efeito da construção em camadas tende a resultar em características de fluxo substancialmente diferentes para o movimento de chorume e infiltração de água no aterro.

O controle do teor de umidade e de outros fatores que influenciam a população microbológica que produz o biogás pode ter um grande impacto na porcentagem do gás total que é produzido, e a taxa em que é produzido.

Dessa forma também é possível controlar ou influenciar de alguma forma a taxa de produção de biogás por meio de diferentes sistemas de tratamento de lixo. Como exemplo, destaca-se que aterros sanitários convencionais de vinte anos atrás são referidos geralmente como 'tumbas secas'. Isto porque o enfoque assumido em seu projeto foi minimizar a água que entra em contato com o resíduo com o intuito de minimizar incursões do chorume resultante para dentro do lençol freático. No entanto, esta prática também limita a taxa de atividade anaeróbica dentro do lixo e, portanto, influencia diretamente a produção de biogás.

A tendência atual é no sentido de sistemas que aumentam o volume de água em contato com o lixo, para então rapidamente estabilizar os resíduos. Esta técnica pode produzir grandes taxas iniciais de geração de biogás ao mesmo tempo em que diminui significativamente a sua taxa de geração depois de alguns anos, o que poderá ser muito necessário e interessante para efeito de minimização de impactos potenciais ou de utilização da área para outros fins.

Para uma caracterização preliminar de um local de disposição de resíduos quanto à geração de biogás, poderemos usar uma simplificação estimando a produção como uma função do volume e idade dos resíduos, o tipo predominante de resíduos e a umidade da massa. A quantificação da geração de biogás é também importante com relação a outros impactos potenciais, tais como problemas de odor e situações de perigo de explosões, incêndios, e movimentação da massa de resíduos. Em geral, quanto mais gás for produzido, mais alta é a probabilidade de que questões de saúde, segurança e incômodo odorífero surjam.

Um dos principais métodos de caracterização de um aterro de resíduos com base em seu potencial de produção de biogás é determinar o fator de ajuste com base na composição de resíduo. Este fator de correção dá conta da proporção de resíduos inertes no aterro, e que não produzirão biogás, e a proporção de resíduos industriais, comerciais/institucionais no aterro que produzirão menos biogás do que resíduos domésticos típicos. O aterro é então classificado como seco ou molhado. Um aterro seco terá uma decomposição mais lenta do que um aterro molhado e, daí, a taxa de produção de biogás será mais baixa, e o tempo de produção será mais longo.

Alguns dos fatores que influenciam o teor de umidade de um aterro incluem a precipitação e a temperatura no local, tipo de cobertura de aterro, condição de cobertura, tipo de sistema de coleta de chorume, e tipo de base de aterro ou alinhamento natural. A classificação do local como molhado ou seco é principalmente

uma função da quantidade de precipitação que se infiltra na massa de lixo. Um enfoque conservador para classificar um local desta forma se baseia na média anual das precipitações. Aterros situados em áreas com menos de 500 mm/ano são classificados como locais relativamente secos, mais de 500 mas menos do que 1000 mm/ano como locais relativamente molhados, e locais situados em áreas com mais de 1000 mm/ano como locais molhados.

Outros assuntos relacionados à produção de biogás incluem o perigo de migração em sub superfície de biogás e o seu impacto sobre a qualidade do ar. Os fatores primários que influenciam a distância com que o gás migra desde os resíduos até os solos adjacentes são, a permeabilidade do solo adjacente ao aterro, e o tipo de cobertura de superfície de solo ao redor do aterro. Geralmente quanto maior a permeabilidade do solo adjacente ao aterro, maior a distância de migração possível. O conteúdo de água do solo tem um efeito importante em sua permeabilidade com respeito ao fluxo de biogás. À medida que o conteúdo de água aumenta, a permeabilidade do solo ou resíduo, para o fluxo de gás, diminui. Além disso, o tipo de solo de cobertura afeta a ventilação do biogás que pode escapar para a atmosfera. Em países de clima frio foi observado que superfícies terrestres congeladas ou pavimentadas limitam a ventilação de gás para a atmosfera e, portanto, aumentam a distância de migração potencial. Um nivelamento do aterro pode também reduzir bastante o potencial para a migração de sub superfície. A presença de solos heterogêneos ao redor do local, ou esgotos ou outras utilidades enterradas nos solos adjacentes ao aterro, aumentarão a distância de migração potencial através desses corredores. O biogás pode migrar a uma distância significativa a partir do aterro, em esgotos ou leito de esgoto. A avaliação do potencial para migração em sub superfície a partir de um local deve necessariamente considerar esses fatores.

Os determinantes primários de impactos na qualidade de ar são a quantidade de biogás emitida para a atmosfera, a concentração de compostos gasosos no biogás, a proximidade do receptor do aterro e as condições meteorológicas.

A qualidade do biogás depende do sistema microbiológico, do substrato (resíduo) sendo decomposto, e das variáveis específicas do aterro tais como a permeabilidade a oxigênio do aterro e o teor de umidade da massa. O biogás é tipicamente descrito com consistindo de aproximadamente 50 por cento de metano e 50 por cento de dióxido de carbono, com menos de um por cento de outros componentes gasosos, inclusive gás sulfídrico ( $H_2S$ ) e mercaptanos (compostos orgânicos que contêm enxofre).

São consideradas para efeito de análise técnica de sua geração na massa de resíduos em degradação biológica, cinco fases de produção de biogás. Estas fases ocorrem durante o tempo ativo de um aterro, isto é, até a situação de maturação da massa de resíduos. Farquhar e Rovers (1973) previram a geração de gás num aterro para lixo municipal típico na década de 1970, e a duração de cada uma dessas fases é dependente de numerosos fatores incluindo o tipo de resíduo, teor de umidade, conteúdo dos nutrientes, conteúdo de bactérias e nível de pH do meio, entre outros.

Alguns parâmetros gerais em relação à duração do ciclo de decomposição para as várias categorias de resíduo são apresentados a seguir. Observe-se que esta é uma diretriz geral e que se deve considerar a grande heterogeneidade do lixo num aterro típico. Também é importante analisar as condições ambientais a que o aterro está submetido, pois têm uma influência significativa neste fator, de tal forma que os ciclos de decomposição não podem ser mostrados simplesmente numa base genérica sem que se tenha tido maiores cuidados nos condicionantes específicos.

**Tabela 2 - Fases da geração de biogás**  
(Farquhar e Rovers, 1973, Rees, 1980, in: Lima, 2002, e Christensen e Kjeldsen, 1989, in: Barbosa, 2001)

FASE	Período típico		CONDIÇÃO	PERÍODO TÍPICO
	Início	Duração		
I	10 a 15 dias	horas a 1 semana	Aeróbia - Fase de ajustamento	Consumo do oxigênio existente na massa. Produção equivalente molar da quantidade de oxigênio. Predominam os microrganismos aeróbios e facultativos.
II	40 a 60 dias	1 a 6 meses	Anaeróbia não metanogênica - Fase Ácida ou Anóxica	Atividade microbiana com predominância de microrganismos anaeróbicos, que são os formadores de ácidos orgânicos e hidrogênio. Esta fase se caracteriza pelo pico da produção de CO <sub>2</sub> que ocorre em média em 60 dias, podendo variar no período típico. A produção de ácidos atinge o seu pico, assim como o hidrogênio. O teor de nitrogênio cai.
III	6 a 12 meses	3 meses a 3 anos	Anaeróbia metanogênica instável	Varição crescente da produção de metano. Atividade microbiana começa a predominar em vista do excesso de ácidos e metabólitos resultantes da fase anterior.
IV	12 a 24 meses	8 a 40 anos	Anaeróbia metanogênica estável	Caracterizada pela constância das taxas de produção e composição dos gases produzidos. Composição média de 50% de metano e 50% de dióxido de carbono. Predomínio dos microrganismos metanogênicos estritos.
V	24 a 60 meses	1 a 40 ou mais anos	Facultativa alcalinogênica - Maturação final, ou metanogênica declinante	A composição de gases tende a voltar à composição inicial, isto é, 80% nitrogênio e 20% oxigênio, pela intrusão do ar atmosférico. Taxas de celulose e matéria orgânica tendem a zero. Resulta a bioestabilização ou maturação final. Microrganismos anaeróbios estritos, produtores do metano na fase anterior, são substituídos por bactérias metanotróficas, as quais consomem metano e dióxido de carbono.
Total	menos de 10 anos	10 a 80 ou mais anos		

A primeira fase, decomposição aeróbia, ocorre imediatamente depois do lixo ter sido colocado, enquanto o oxigênio está presente dentro da massa de resíduos. A decomposição aeróbia produz dióxido de carbono, água e calor.

A próxima fase é anóxica, não metanogênica, em que compostos ácidos e gás hidrogênio são formados, e há continuada produção de dióxido de carbono.

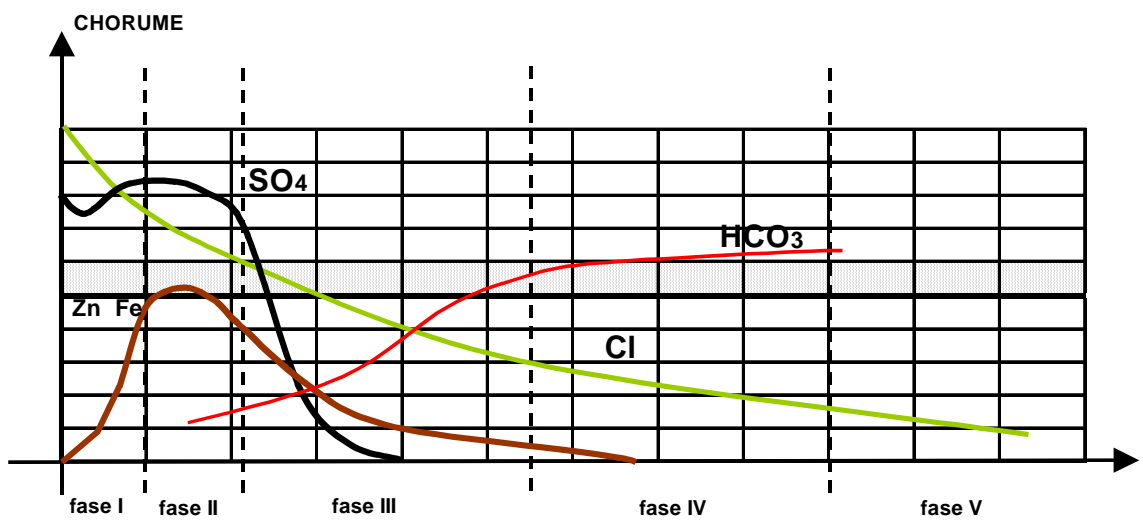
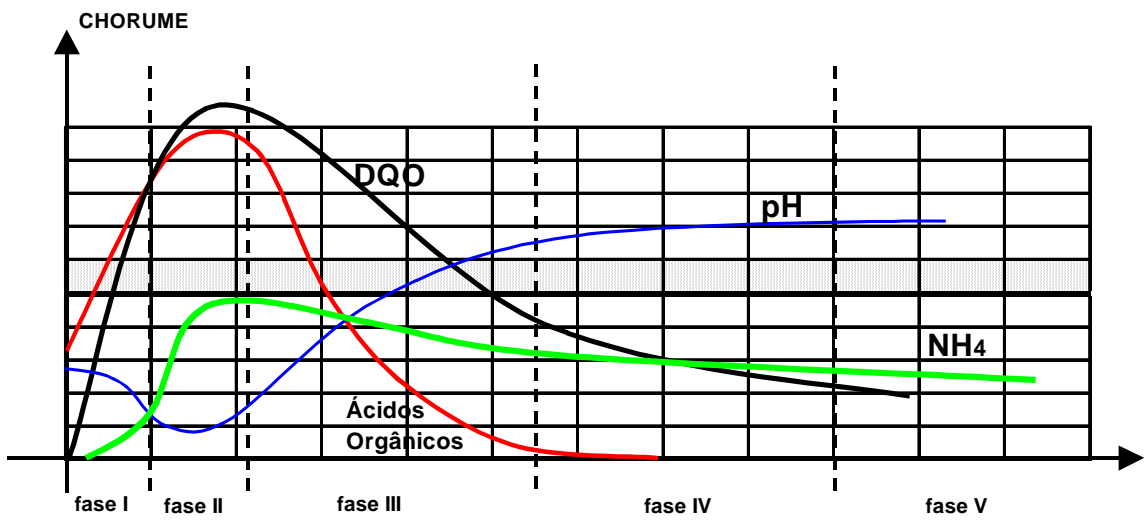
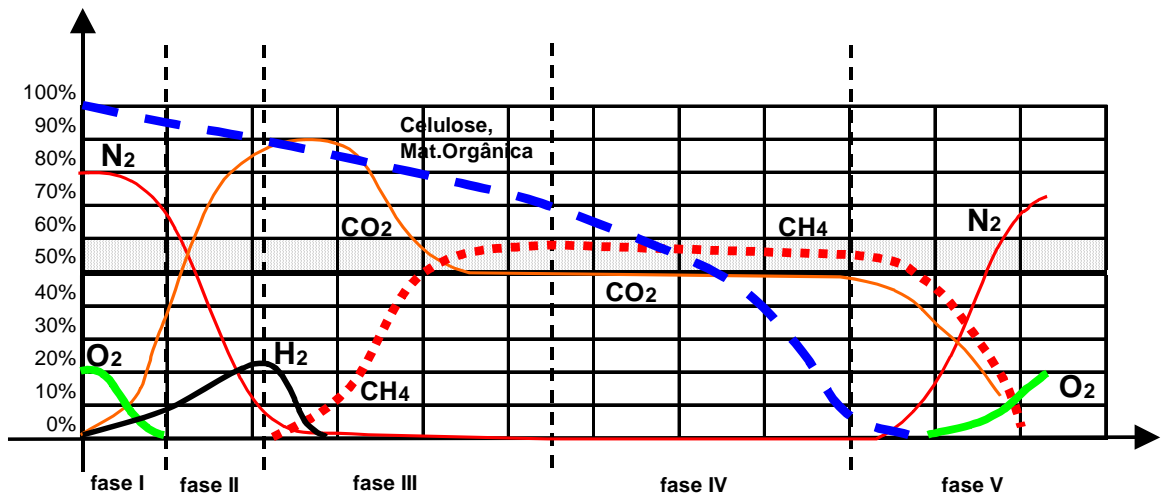
A terceira fase é a instável fase metanogênica. Durante esta fase, a produção de dióxido de carbono começa a declinar porque a decomposição do lixo muda da decomposição aeróbia para a decomposição anaeróbia. A decomposição anaeróbia produz calor e água mas, diferentemente da decomposição aeróbia, também produz metano.

Durante a quarta fase o metano é gerado numa forma entre 40 e 70 por cento do volume total. Tipicamente o lixo na maior parte dos aterros atingirá a fase metanogênica estável em 2 anos depois que o lixo tenha sido depositado. Dependendo da profundidade das cargas do lixo e do teor de umidade do resíduo, a fase metanogênica pode ser alcançada tão rapidamente quanto seis meses após a colocação.

Uma quinta e última fase é a de maturação ou metanogênica declinante, quanto a composição de gases produzidos tende a voltar à composição inicial, isto é, 80% de nitrogênio e 20% de oxigênio, pela inertização da massa e intrusão do ar atmosférico. O biogás pode ser produzido num aterro durante numerosas décadas com emissões mantendo-se em níveis declinantes até por 100 anos desde a data de depósito.

Na figura a seguir – Fases da geração de biogás – são apresentados os gráficos da geração dos principais gases ao longo das fases tradicionais e do tempo ativo da biomassa.

Também, para efeito comparativo, fase por fase, os gráficos ilustrativos da evolução ao longo do tempo dos parâmetros característicos do chorume produzido em um aterro de resíduos sólidos urbanos, conforme estudado por Christensen e Kjeldsen (1989) a partir de pesquisas em lisímetros.



**Figura 1 - Fases da geração de biogás**  
 (Farquhar e Rovers, 1973, Rees, 1980, in: Lima, 2002, e  
 Christensen e Kjeldsen, 1989, in: Barbosa, 2001)

### **2.3.2 PRODUÇÃO DE METANO**

Pela compilação das experiências relatadas em aproximadamente 200 artigos técnicos publicados sobre a produção, oxidação e emissões de metano em aterros e outros ambientes Haarstad (1997) conseguiu abranger e sintetizar indicadores muito interessantes para estudos no assunto. Destaque-se a oxidação do metano em condições de campo em aterros, em condições de laboratório em ensaios de coluna, assim como a oxidação em outros ambientes tais como em solos de florestas e de pântanos. Sua análise avança pela tabulação dos processos físicos e químicos que influenciam a produção e oxidação do metano. Também analisa os fatores e processos microbiológicos que influenciam esta oxidação.

Disso observou que as emissões de metano provenientes de aterros aumentam quando o biogás é bombeado para fora do aterro, e esse aumento é freqüentemente mais de 20 vezes a produção no processo natural, sem bombeamento. Portanto, conclui, obter uma redução no aquecimento global quando transformamos o metano em CO<sub>2</sub>, não parece razoável, pois bombeando o biogás dos aterros podemos induzir a entrada de ar na massa do aterro transformando a biodegradação em fase acetogênica e, portanto, aumentando as emissões de chorume que por sua vez aumentam a produção de metano. É possível concluir, baseado nesse trabalho, que a produção de metano pelos aterros de resíduos sólidos municipais poderá ser reduzida, ou mesmo eliminada, pela utilização de métodos de engenharia relativamente simples utilizando coberturas argilosas para a oxidação do metano. Isto parece ser bem mais econômico do que o bombeamento do biogás, especialmente considerando o tempo longo, de até cem anos, que um aterro pode produzir e emitir gases.

### **2.3.3 IMPACTOS POTENCIAIS**

As emissões de biogás se constituem em potenciais problemas para os administradores municipais e para as pessoas residentes na vizinhança dos aterros de lixo. Para isto contribuem parâmetros tais como a localização do aterro; a topografia vizinha; a existência de usuários em terra adjacentes; as condições meteorológicas locais e as características do aterro que influenciam na geração e também na coleta dos gases.

São geralmente os constituintes de traço, tais como o gás sulfídrico (H<sub>2</sub>S) e os mercaptanos (compostos orgânicos com enxofre), os compostos primários associados

às emissões com mau cheiro dos aterros. Esses compostos tipicamente constituem menos de 1 por cento do biogás, mas o mau cheiro é uma característica desses gases e pode ser detectado em concentrações químicas específicas até o mínimo de 0,001 a 0,005 partes por milhão (ppm) (World Bank, 2004).

O nível no qual esses compostos químicos podem ser prejudiciais à saúde humana varia, mas são tipicamente ordens de magnitude maiores do que as acima referenciadas. Isso significa que detectar o odor não é necessariamente uma indicação de uma preocupação com a saúde, mas pode ser um incômodo real e uma condição adversa em relação à qualidade de vida na área influenciada pelo aterro.

O odor resultante da emissão do biogás opera num princípio de limite. Assim, se a quantidade de biogás exceder o nível de limite de condições particulares no aterro, haverá odor relacionado à produção de biogás. A seguinte analogia pode ser usada para melhor se compreender o conceito de um limite de odor. Deixemos o volume de uma xícara representar a quantidade total de biogás que pode ser emitida antes de se atingir o limite do odor. O tamanho desta “xícara” para cada aterro é determinado por numerosos fatores, incluindo a localização do aterro, a topografia vizinha e as condições meteorológicas e ambientais. Deixemos a água derramada dentro da xícara representar a emissão do biogás sem tratamento. A xícara pode estar “cheia até a borda” e ainda não derramar líquido algum. No entanto, se a capacidade da xícara for excedida, mesmo por uma gota, vai haver fluxo excessivo e o líquido se derramará. Portanto, a quantidade de água na xícara pode variar com a capacidade da xícara, desde que o limite de volume não seja excedido. Este conceito é análogo para emissões odoríferas de biogás. Para se assegurar que o odor incômodo não seja uma preocupação, a quantidade de biogás emitida precisaria ser menor do que o limite de odor no aterro, para dadas condições meteorológicas e outras.

Portanto, na situação em que o odor de biogás é uma preocupação, é menos importante quanto biogás é coletado em comparação com quanto biogás é emitido do aterro, e se essa quantidade de biogás emitida excede o limite do aterro. Este assunto é um pouco complicado pelo fato de que o limite não é um número fixo. Ele varia dependendo de condições meteorológicas e da distância de separação entre o aterro e os receptores do odor (moradores).

O componente mais importante do biogás, a partir da maioria das perspectivas, é o metano, que constitui aproximadamente 50 por cento do volume de biogás produzido. O metano é um perigo potencial por ser combustível e explosivo em concentrações entre 5 e 15 por cento em volume, no ar. O biogás pode migrar abaixo da superfície nas zonas não saturadas, especialmente durante os meses de inverno e primavera quando o chão está muito frio ou saturado com umidade na superfície. O

biogás pode então se acumular em estruturas fechadas resultando um perigo potencial. O metano é incolor e não tem odor e é, portanto, impossível de ser detectado sem instrumentação apropriada.

O metano emitido de aterros pode ser identificado também como um contribuinte significativo às emissões de gás de efeito estufa (GHG), que contribuem para o aquecimento global. Num horizonte temporal de 100 anos, em comparação com o dióxido de carbono, o metano é considerado 21 vezes mais eficiente em isolar o calor dentro da atmosfera (IPCC, 2001). Este valor está atualmente sob revisão e poderia ser potencialmente revisado para cima no futuro, aumentando ainda mais o incentivo para projetos de gerenciamento de biogás.

O metano gerado de resíduos sólidos e de águas servidas, por meio da decomposição anaeróbia, representa cerca de 20 por cento das emissões de metano induzidas pelo homem. As emissões de biogás à atmosfera podem ser reduzidas por meio das medidas de redução de resíduo tradicionais, tais como reciclagem e formação de composto. Também podem ser reduzidas pela captura e queima do biogás, convertendo a fração metano do gás em dióxido de carbono e vapor d'água, o que no caso é menos prejudicial de forma geral.

#### **2.3.4 MEDIDAS DE EMISSÕES**

Várias técnicas de medidas de campo de biogás foram avaliadas por Cossu et al. (1997) referentes às medições de superfície de aterros de resíduos sólidos, para se obter uma comparação dos vários métodos e compreender a influência na geração de gás proveniente de vários fatores. Dentre estes, os procedimentos do gerenciamento do aterro, a idade dos resíduos, as características do material de cobertura, a presença de chorume no corpo do aterro, as condições atmosféricas, etc. Essa influência foi analisada na migração do biogás através da massa de lixo e, portanto, nas emissões superficiais do biogás.

Um dos grandes problemas ambientais relacionados ao aterro de resíduos sólidos é a emissão incontrolada de biogás. Localmente temos o problema representado pela difusão do gás e do odor resultante assim como a emissão de substâncias perigosas. No entanto, os aterros têm uma importante contribuição para o balanço mundial de metano. A contribuição estimada para a emissão global do metano é da ordem de 8%, com uma tendência a um aumento progressivo devido ao fato de

que o aterro de resíduos sólidos será, cada vez mais, a principal forma de disposição de resíduos sólidos municipais dos países em desenvolvimento.

Diferentes métodos são utilizados para a avaliação das emissões superficiais de biogás de um aterro. Dentre elas as principais são: câmaras de fluxo, detecção de traços de gases, análise por infravermelho, etc., mas permanecem muitas incertezas quanto aos seus usos, assim como na compreensão dos fatores que afetam a emissão dos gases. As principais pesquisas necessárias nesse aspecto são:

- Identificação das técnicas mais apropriadas para a medição;
- Avaliação dos procedimentos de medição (frequência de amostragens, etc.);
- Avaliação da influência das características do material de cobertura do aterro nas emissões superficiais de biogás;
- Avaliação da importância dos processos de oxidação do metano;
- Avaliação da importância dos fatores atmosféricos;
- Estabelecimento da influência dos mecanismos de advecção e difusão;

Medições realizadas a partir de 1995 no aterro de Pescantina na Itália (Cossu et al., 1997), que possuía na época uma área de superfície de aterro de 7,2 ha e aproximadamente 1,6 Mt de resíduos dispostos, concluíram pela grande variação espacial, qualitativa e quantitativa, das emissões superficiais de gases. Pelo observado isto foi resultado, principalmente, dos procedimentos de um gerenciamento não muito adequado da operação daquele aterro assim como do tempo decorrido da disposição dos resíduos.

Foram realizadas medições dos gases com a utilização de câmaras estáticas e dinâmicas assim como com termógrafo por infravermelho. Foi identificada, nas emissões medidas, a proporção aproximada de 50% para CH<sub>4</sub> e 50% para CO<sub>2</sub>. Uma predominância de CO<sub>2</sub> foi justificada pela influência da eficiência do processo de oxidação do metano na camada de cobertura, já transformando parte do metano em CO<sub>2</sub> durante a sua migração pelo solo depositado

As variações das emissões de gases, medidas com a câmara estática, foram identificadas com aproximadamente 1,0 NI/m<sup>2</sup>.min em setores do aterro já concluídos contra 0,5 NI/m<sup>2</sup>.min nos setores em operação, devido provavelmente a estar a massa de resíduos numa fase de pico de produção de gases em função do tempo decorrido da disposição, e também pela identificação da existência interna de bolsões de chorume o que comprovadamente aumenta a produção de gás na massa. Também se destaca que a mudança das características dos resíduos, tais como a sua

composição e permeabilidade, causam grandes diferenças na produção de biogás entre pontos localizados bem próximos. Isto ajuda a entender um dos principais problemas que ocorrem quando fazemos medições pontuais de gases na superfície de um aterro, de forma a que muitas medições são necessárias e com análise estatística acurada para avaliar os níveis médios de emissões de gases de um aterro. Isto implica num longo tempo de medições o que aumenta em muito os custos envolvidos.

Dessa forma a medição de gases com a utilização de câmaras de fluxo foi considerado (Cossu et al., 1997) um dos melhores métodos utilizados. Isto pela facilidade de monitoramento defendida pelo autor o que resulta na utilização em pesquisas tais como a influência da qualidade e da idade dos resíduos depositados, das características do material de cobertura, das condições atmosféricas, e para os procedimentos de medições para qualificar e quantificar as emissões gasosas superficiais de aterros.

Foram realizadas medições simultâneas com câmaras de fluxo do tipo estática, dinâmica e com o termógrafo por infravermelho. Constatou-se que, considerando as baixas taxas de emissão dos gases nos aterros, a câmara estática é a mais recomendável. Isto porque a admissão de ar externo no tipo dinâmica tende a influenciar na taxa de emissão resultando em valores 2 a 6 vezes os medidos pela estática quando ocorrem vazões pequenas de gases. Além disso a câmara dinâmica exige um procedimento de calibração muito dependente do volume da câmara que está sendo utilizada. Por sua vez o método com infravermelho é mais adequado para valores médios de emissões em grandes áreas, ou para fazer uma avaliação prévia rápida da presença de gases, identificação de pontos de escapes de biogás, medir em pontos específicos onde é impossível utilizar a câmara de fluxo, etc. Foi identificada uma correspondência bastante consistente dos resultados obtidos com a câmara de fluxo estática e do termógrafo por infravermelho, sendo as melhores correspondências ocorrendo nas maiores taxas de emissões. No entanto o modelo de interpretação do infravermelho depende dos dados inseridos no aparelho tais como a composição e temperatura do gás para cada ponto de medição na superfície do aterro de resíduos, o que nem sempre está disponível ou fácil de obter. É mais fácil encontrar valores médios para todo um aterro ou para setores dele.

Em vista das medições realizadas simultaneamente e da avaliação de suas performances foi concluído que a melhor utilização seria com do método com a câmara de fluxo tipo estática (Cossu et al., 1997).

### 2.3.5 OXIDAÇÃO DE METANO NAS CAMADAS DE COBERTURA

Uma grande parte das emissões de gases de efeito estufa é relacionado com aterros de resíduos sólidos municipais. Dessa forma é muito importante considerar que a oxidação microbiana nas partes aeradas das coberturas em argila desses aterros pode limitar ou minimizar os fluxos das emissões de metano.

Börjesson (1997), em interessante trabalho apresentado no congresso de Sardinia 1997, objetivou determinar a importância relativa da umidade e temperatura do solo de cobertura de aterros de resíduos, assim como a da pressão atmosférica, no controle das taxas de emissões de metano. Buscou também identificar os organismos responsáveis pela oxidação do metano e qual seria a influência do tipo de solo utilizado.

Como as mais importantes conclusões destacou:

- Que as bactérias metanotróficas (às quais Conrad (1995) chamou de “obrigadas” devido às suas características de requererem o consumo de metano o qual deve ser utilizado como única fonte de carbono e energia para o seu crescimento), são os mais importantes organismos envolvidos na oxidação do metano através dos solos de cobertura dos aterros de resíduos sólidos;
- Fluxos difusivos de metano através do solo de cobertura podem efetivamente ser mitigados pela oxidação microbiana nesse solo, mas seu efeito é consideravelmente pequeno à baixas temperaturas;
- Altos fluxos de gases devido ao fluxo advectivo na massa de resíduos são influenciados pelas mudanças na pressão atmosférica, com a observação realizada de que altas emissões coincidem com baixas pressões atmosféricas;
- A extração de gases por bombeamento permite que as emissões de metano sejam reduzidas em aproximadamente 80 a 90% do seu potencial;
- A extração de gases em combinação com a oxidação de metano pode evitar quase todas as emissões superficiais de metano nos aterros de resíduos sólidos municipais;

No entanto destaca que, obviamente, a oxidação de metano deverá ser considerada nos orçamentos envolvendo aterros de resíduos. Mas, enfatiza, mais dados são necessários para avaliar os efeitos da oxidação em relação às características do aterro no que se refere às suas dimensões, o tempo de operação e de seu encerramento, tipo de solo de cobertura, variações climáticas na região e pressões atmosféricas predominantes, etc. Observa também que um solo orgânico é

uma boa solução para prevenir as emissões de metano, destacando no entanto dos problemas causados pela tendência ao surgimento de fissuras por ressecamento, o que resultaria em provocar maiores emissões do que o previsto.

Observa, finalmente, que a mistura de solos normais de cobertura (argilosos) com materiais contendo matéria orgânica, tais como a lama de esgoto, não é suficiente para prevenir a emissão de metano em climas frios. Conclui que a combinação de uma extração de gases altamente eficiente e a utilização do biogás para fins energéticos, provavelmente oferece a melhor opção de gerenciamento das emissões gasosas.

Foi também estudada por Grantham et al (1997) a eficiência dos sistemas de coberturas de aterros de resíduos sólidos municipais, considerando que o controle de qualidade requerido nos procedimentos de realização da cobertura é um fator crucial na minimização das descontinuidades e defeitos da camada de cobertura.

Foi gerado, naquelas pesquisas, um volume muito grande de dados relativo ao objetivo traçado de avaliação de coberturas, cuja indicação é de que o sistema de cobertura com solos apropriados apresenta uma boa eficiência na prevenção das emissões de metano para a atmosfera. Entretanto, para compreender completamente os mecanismos que resultam uma satisfatória performance da cobertura, estudos mais intensivos e de maior sensibilidade são requeridos em áreas menores da cobertura. Os estudos devem se concentrar na busca do entendimento completo das propriedades geotécnicas, físicas e microbiológicas da cobertura, e confrontá-los com as informações já obtidas e com a performance requerida com relação à infiltração de água. Concluiu também que as informações obtidas e analisadas nos estudos realizados poderão ser utilizados nos projetos e especificações de coberturas para outros aterros de resíduos sólidos municipais. No entanto, enfatizou, que um programa de controle de qualidade da disposição dos materiais é recomendado para minimizar as descontinuidades e defeitos na cobertura. Daí considerou que uma disposição correta dos solos de cobertura tem uma grande influência no controle das emissões gasosas para a atmosfera, mais do que a própria espessura da camada. Dessa forma um rigoroso controle de qualidade resultará em evitar defeitos minimizando tanto as emissões de metano para a atmosfera quanto a contaminação da massa de resíduos com ar atmosférico durante a extração dos gases (o que altera a biodegradação no aterro) e, dessa forma, poderá permitir a utilização de camadas de cobertura mais finas e, portanto, mais econômicas.

Destacamos também que Savanne et al. (1997) analisou e comparou sete métodos para avaliação da densidade de fluxos de metano de um aterro de resíduos sólidos municipais em operação. Dois métodos utilizando câmara de acumulação, dois

utilizando técnicas micrometeorológicas, dois métodos com gases traçadores, e um com termógrafo por infravermelho. Nessa avaliação foram considerados os aspectos científicos, técnicos e econômicos envolvidos nos processos de migração de metano.

## **BARREIRAS DE OXIDAÇÃO DE METANO**

O estudo de barreiras de oxidação de metano utilizando bactérias metanotróficas é um tema de grande relevância nos estudos para a minimização dos impactos potenciais decorrentes da geração de biogás em aterros de lixo. Isto é realizado basicamente pela utilização de barreiras reativas de oxidação passiva de metano, formada de solos porosos e com condições propícias de umidade e compactação.

Este assunto é muito importante dentro da mecânica dos solos não saturados, uma vez que está fundamentalmente ligado ao clima ou condições do meio ambiente onde está inserido. Conseqüentemente é necessário que se aumente o conhecimento dos fatores climáticos e de como eles afetam o comportamento mecânico e hidráulico dos solos para que se possa melhor estudar tanto estes tipos de barreiras quanto o papel das barreiras convencionais de remediação de plumas de contaminação.

O metano emitido para a atmosfera, e mais precisamente localizado na troposfera, reage com os radicais hidroxil (OH) formando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e água. A formação dos hidroxis depende da fotólise do ozônio pela radiação ultravioleta solar. A presença do metano reduz a capacidade de oxidação da atmosfera, o que aumenta o efeito de outros poluentes.

A maior parcela da energia solar que penetra na atmosfera alcança o solo. Parte deste calor é, no entanto, refletido de volta pelas camadas exteriores da atmosfera. Neste balanço de energia a Terra retém o calor. Esta retenção se dá devido à presença de água e dióxido de carbono.

O calor retido mantém a temperatura global em níveis adequados para a sua habitabilidade. De outra forma a Terra seria um planeta frio e sem condições de manter a vida como hoje a conhecemos.

Os aterros sanitários são responsáveis por cerca de 5 a 6% das emissões de gás metano através da ação antropogênica (IPCC, 2001). A emissão de gases poluentes de aterros sanitários é uma forma de poluição atmosférica que precisa ser melhor investigada.

Os processos de decomposição da matéria orgânica em aterros de RSU resultam na geração de gases tóxicos que afetam o meio ambiente. O processo aeróbio de decomposição se estabelece quando existe a influência das condições

climáticas na massa de lixo. Isso acontece com maior intensidade quando o resíduo está sendo depositado sem que tenha ocorrido a cobertura final do mesmo.

O principal gás gerado nessa fase do processo de degradação, aeróbio, é dióxido de carbono. Mas um processo anaeróbio de decomposição do resíduo ocorre quando o oxigênio aprisionado na massa de lixo for totalmente consumido pelas bactérias aeróbias. Para isso, o sistema de cobertura e drenagem deve ser tal que minimize as influências meteorológicas no processo de decomposição do resíduo.

Para identificação da duração de cada processo de degradação do lixo e as influências das condições climáticas na decomposição dos resíduos, um minucioso monitoramento ambiental do aterro necessita ser empregado analisando principalmente: recalques, geração de gases e chorume, análise físico-químicas e microbiológicas associados aos fatores meteorológicos (Mahler et al., 2005).

Na operação dos aterros sanitários são encontradas grandes dificuldades pelos seus gerenciadores para uma recuperação eficiente do gás metano produzido na massa de resíduos. Por mais eficaz que seja o processo sempre se considera um escapamento entre 10 a 20% do metano. Isto se deve ao processo de captação por poços de sucção inseridos na massa e que, mesmo com a atuação de bombas, não é suficiente para coletar todo o gás. Considere-se ainda que na maioria dos sistemas o processo é de utilização de poços de drenagem verticais, montados à medida que a altura de resíduos aumenta. Esta drenagem ocorre de forma convectiva, também induzida pelo aquecimento da tubulação decorrente do calor liberado pelo próprio processo de degradação da massa putrescível dos resíduos, além do fato do gás metano ser mais leve que o ar e naturalmente fluir pelas chaminés verticais, que se constituem os drenos implantados.

Como grande contribuição para a minimização das emissões de biogás nos aterros é cada vez mais difundida a proposta de utilização da atuação de barreiras reativas de oxidação passiva. Elas resultam do recobrimento da massa de resíduos depositada com camadas de argilas aplicadas com conhecimento e técnicas geotécnicas. Este processo é considerado eficiente e economicamente viável, uma vez que para a sua utilização são utilizados equipamentos comuns, isto é, tratores e pás-carregadeiras.

Este processo acaba por substituir equipamentos e sistemas ativos, na maioria das vezes de operação e manutenção onerosa e até complexas, tais como sistemas de bombeamento do biogás. Estes sistemas, entre outros, conforme experiências realizadas e aqui relatadas, acabam até por induzir um aumento nas emissões de biogás, pois alteram os processos e fases de biodegradação da massa de resíduos.

Uma das grandes vantagens apontadas do sistema de utilização de barreiras reativas de cobertura está no fato de praticamente não requererem manutenção e, por isso, reduzem os custos de pós-fechamento dos aterros de RSU. Além disso usam materiais alternativos, se disponíveis, junto ou não com a massa de argila, tais como rejeitos industriais ou de mineração.

A atuação de uma barreira reativa de oxidação passiva se dá através de suas características geotécnicas e biológicas, uma vez que é um processo de transformações químicas e biológicas que oxidam o gás metano em gás carbônico e água.

Esta barreira funcionará como uma camada permeável que permitirá o fluxo de gás metano, atuando como um reator biológico. Durante a passagem ocorrerá a oxidação do gás metano em gás carbônico e água.

Os processos biológicos atuantes são dependentes das necessidades nutricionais dos microorganismos que normalmente se encontram disponíveis na massa de resíduos e na camada a considerar, do tipo de metabolismo microbiano, segundo a necessidade de oxigênio molecular, dos tipos de microorganismos importantes na conversão dos resíduos sólidos, das condições ambientais, das transformações aeróbias e anaeróbias, e da seleção dos processos utilizados para a degradação biológica (Tchobanoglous et al., 1993).

A transformação aeróbia geral dos resíduos sólidos pode ser descrita com a seguinte equação:

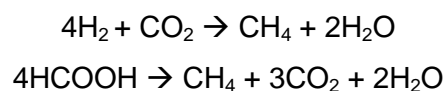
Matéria orgânica + O<sub>2</sub> + nutrientes  $\xrightarrow{\text{bactérias}}$  novas células + matéria orgânica resistente + CO<sub>2</sub> + H<sub>2</sub>O + NH<sub>3</sub> + SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> + .... + calor

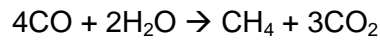
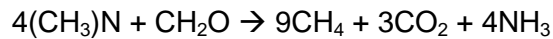
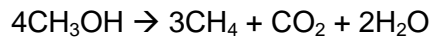
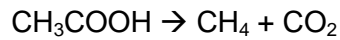
A equação geral de transformação anaeróbia pode ser apresentada por:

Matéria orgânica + H<sub>2</sub>O + nutrientes  $\xrightarrow{\text{bactérias}}$  novas células + matéria orgânica resistente + CO<sub>2</sub> + CH<sub>4</sub> + NH<sub>3</sub> + H<sub>2</sub>S + calor

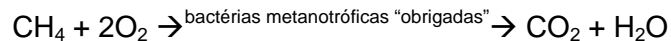
Na transformação anaeróbia dos resíduos, com a produção do metano mediante digestão ou fermentação anaeróbia, pode ser representada pelas seguintes rotas bioquímicas, passando pela hidrólise dos lipídeos, polisacarídeos, proteínas e ácidos nucléicos os quais, após a fase acetogênica resultam em metano e dióxido de carbono.

As equações básicas que resultam no metano, reações em meio anaeróbio, são:





Já os gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2$  e  $\text{CO}_2$  podem ser oxidados na camada de solos de cobertura se oxigênio estiver disponível. Portanto o processo de oxidação do metano nos solos de cobertura é um processo aeróbio, microbiológico, que ocorre na biosfera existente nessas condições sempre que metano e oxigênio estiverem presentes, e juntos. A oxidação pode ser descrita pela seguinte equação (Börjesson et alli., 1993):



e que indica uma redução de volume de tres volumes de gás para um volume de  $\text{CO}_2$ . Bactérias metanotróficas chamadas de "obrigadas" são consideradas aquelas que requerem metano como a sua única fonte de carbono para prover seu desenvolvimento e manutenção.

Observe-se que as taxas de oxidação do metano, conforme testes em aterros e em laboratório (Haarstad, 1997), indicam medidas na faixa de 7 a 45 g de metano/ $\text{m}^2$ .h, enquanto que as taxas de emissões de metano, medidas nos aterros de RSU, valores médios para países de clima frio, ficam em 0,32 g de metano/ $\text{m}^2$ .h. Isto enfatiza que o potencial de oxidação de metano pelas camadas de solos de cobertura excede as taxas de produção nos aterros.

Börjesson et al. (1997) encontrou valores de oxidação do metano, medições realizadas nos aterros, na faixa de 1,9 a 6,3 g/ $\text{m}^2$ .h, medindo em profundidades até 0,80 metros, considerando um periodo de observações de dois anos. Os testes de coluna em laboratório, como seria de supor, sempre indicam valores maiores do que os de campo em vista da situação controlada em que são realizados.

A camada é constituída de um material poroso e os aspectos importantes a serem obedecidos para que a barreira seja eficiente devem ser estudados dentro do ponto de vista geotécnico. Permeabilidade à água e ao gás, retenção de água, escolha de materiais, estão entre os principais a considerar.

Basicamente este meio serve de habitat para microorganismos do grupo bacteriano metanotrófico, que utiliza o metano como nutriente principal para a formação de sua colônia de indivíduos, e que transforma o metano em dióxido de carbono e água. As bactérias metanotróficas formam um grupo único e

fisiologicamente distinto pela sua habilidade de usar o gás metano como única fonte de carbono e energia. Maior parte do metano consumido neste processo vai para a formação da biomassa bacteriana.

A barreira, por ser construída de material poroso, permitirá a passagem do metano pela camada e, à medida que o gás flui pela barreira ocorrerá a oxidação do gás por atuação dos microorganismos lá presentes. Desta forma será eliminado para a atmosfera não mais o metano e, sim, o gás carbônico e água.

O projeto e execução de barreiras podem se utilizar de resíduos gerados nas minerações de britas e areias, resíduos industriais, minério de ferro e solos em geral. Busca-se no projeto criar um meio propício à existência de uma fauna microbiana do tipo aeróbica metanotrófica. Para uma maior eficiência dos processos é necessária a utilização de engenharia geotécnica, com bom conhecimento das técnicas de compactação de solos, caracterização de meios porosos, solos não-saturados, características de permeabilidade destes solos, etc, sejam eles silte-argilosos ou misturados com rejeitos dos tipos acima descritos, assim como conhecimentos fundamentais dos processos microbiológicos. Disto resultam desenvolvimentos multidisciplinares, o que normalmente caracteriza os estudos ambientais principalmente na área de resíduos sólidos, sejam eles do tipo domiciliares quanto os industriais, perigosos.

Através dos estudos assim realizados é possível o desenvolvimento do perfil mais adequado das camadas de solos com a finalidade de atenuação do metano pela sua oxidação. No entanto, destaque-se, o assunto é bastante complexo, além de multidisciplinar, e requer muitas pesquisas tanto de laboratório quanto de campo, uma vez que muitas são as variáveis a considerar neste cenário.

Dentre os principais fatores e variáveis a considerar para o projeto e especificação de uma camada adequada de atenuação da emissão de metano destacam-se:

- Potencial dos materiais a utilizar nas barreiras no que se refere à sua capacidade de manter colônias dos organismos que fazem a transformação do metano.
- A observação de critérios geotécnicos dos solos e/ou materiais a utilizar na camada, quanto a parâmetros de resistência, deformabilidade e de capacidade de retenção de água.
- Necessidade de caracterização dos solos através de ensaios geotécnicos para obtenção de: granulometria, densidade específica, limites de Atterberg (índices de consistência dos solos), curva de compactação,

permeabilidade, resistência ao cisalhamento, curva de retenção de água, testes de coluna, etc.

- Estudos dos fatores bióticos envolvidos nos processos de oxidação do metano, através de ensaios bacteriológicos. Objetiva-se o estudo dos fatores tais como a evolução da biomassa e das colônias, condições limites de desenvolvimento em termos de nutriente e umidade, tempo de residência do gás, etc.
- Considerando que a biodegradação é o principal processo atuante, e um dos mais complexos, e que nos RSU é anaeróbio o predominante, deverá ser também considerado que a atuação se dá por um consórcio de diferentes tipos de microorganismos. Isto, do ponto de vista microbiológico, resulta numa maior complexidade no que se refere à previsão e obtenção dos resultados desejados.
- Fatores referentes às variações climatológicas e sazonais, tais como a temperatura, umidade, pressão atmosférica, precipitação;
- Fatores referentes à variação das características do solo (textura, estrutura, espessura, compactação saturação); os físicos: umidade, estrutura e textura do solo; os químicos: pH, nitrogênio; controles de engenharia: extração do gás; e os bióticos.

A importância do teor de umidade, assim como a temperatura, o grau de saturação, e o pH do solo são preponderantes na caracterização dos processos envolvendo camadas de cobertura oxidantes.

O grau de saturação da massa de cobertura deverá estar mantida entre 60 a 80%, de tal forma que permita a passagem do gás e ao mesmo tempo o desenvolvimento das colônias de bactérias metanotróficas. O fluxo de gás não poderá ser rápido nem muito lento.

Os tipos de solo utilizados são argila, areia grossa, ou areia fina, podendo se utilizar de misturas que resultem nas características mínimas para obtenção do meio propício conforme anteriormente citado. Mas é de fundamental importância o conhecimento dos aspectos relativos ao comportamento geotécnico dos materiais a serem utilizados.

Os aspectos climáticos são muito importantes para o desenvolvimento das bactérias metanotróficas (Borjesson et al. 2001), uma vez que influenciam na variação da quantidade de água do solo. Como ênfase destacamos que não ocorre digestão anaeróbia ao longo de toda a profundidade de um aterro devido, também, às condições climáticas locais que condicionam um processo aeróbico nas camadas superficiais.

### **3 METODOLOGIA**

Nesse capítulo de metodologia busca-se diretrizes para melhor caracterizar, analisar e avaliar riscos ambientais por exposição humana a aterros de resíduos sólidos.

---

#### **3.1 RISCOS À SAÚDE HUMANA POR EXPOSIÇÃO A ATERROS**

É apresentada uma metodologia proposta pela OMS (Organização Mundial da Saúde), da qual resultam diretrizes para a avaliação de riscos à saúde humana, assim como para a investigação epidemiológica necessária por decorrência da avaliação inicial.

Esta metodologia foi utilizada para a avaliação das exposições no estudo de caso da dissertação, no capítulo “Estudo de Caso”, quando então se objetiva validá-la como instrumento de avaliação.

##### **3.1.1 OBJETIVOS**

O potencial de risco à saúde humana e ao meio ambiente decorrente da disposição de resíduos, tanto perigosos quanto não-perigosos, em aterros de resíduos sólidos urbanos, é um assunto de interesse público permanente e relevante. No entanto esta relevância é baseada numa evidência não tão clara e definida, podendo ser considerada, nas discussões e análises realizadas, até equivocada. Um encontro da OMS em 1998 (WHO, 2000), revisou as informações disponíveis de pesquisa sobre o assunto, concluindo que, com os dados apresentados havia a suspeita de que as populações expostas a emissões provenientes de aterros de lixo estariam sujeitas a riscos de afetar a sua saúde, quando vizinhas a estas áreas. No entanto os dados disponíveis eram insuficientes para realizar a avaliação de risco. O maior problema foi a escassez de informações quantitativas da exposição e a não consistência dos métodos de avaliação de exposição utilizados para obter os dados disponíveis. Foi consenso no encontro da OMS que dados mais científicos e melhor focados seriam necessários para ajudar os administradores e os gerenciadores de resíduos com

respeito à otimização de práticas, prevenção de impactos na saúde humana e melhorias nas comunicações de riscos. Complementarmente, os países europeus necessitavam combinar seus esforços e conhecimentos para providenciar bases mais sólidas para decisões nesta matéria. Desta forma um novo encontro sobre este tema foi realizado em 2000.

### **ESCOPO E PROPÓSITO**

O objetivo do encontro (realizado de 10 a 12 abril de 2000 na Polônia), foi recomendar métodos para avaliação da exposição às emissões perigosas provenientes de aterros de resíduos sólidos urbanos, e produzir linhas de orientação prática com relevantes indicadores de exposição e métodos para a sua determinação para futuras avaliações de exposições em situações locais.

A discussão foi dividida em três grupos cujos focos foram:

- ❑ caracterização de um sítio com a determinação do potencial das exposições usando os dados disponíveis, a identificação dos caminhos (rotas) de exposição e os meios potenciais de contato.
- ❑ Caracterização da população sob risco e a avaliação da necessidade de medição de exposições;
- ❑ Avaliação da necessidade de estudos de saúde, e as informações requeridas.

### **SUMÁRIO E DISCUSSÃO**

Considerações básicas para formulação das diretrizes dos estudos de avaliação de exposição:

- 1) Os diferentes propósitos dos estudos a serem realizados devem estar bem definidos antes de seu início;
- 2) Uma área de aterro para estudos de avaliação inclui aterros sanitários, controlados e lixões. Incluem também as áreas em uso e as abandonadas;
- 3) A população sob risco inclui trabalhadores, moradores da área ou próximas a elas, ou futuras populações nas áreas consideradas, quando for prevista alguma utilização diferente da área;
- 4) A avaliação de exposição é considerada como uma quantificação das atuais exposições ou concentração de contaminantes, assim

como o cálculo, estimativa ou modelagem de exposições baseadas nos dados atuais.;

- 5) Um conjunto padronizado de critérios ou indicadores para quantificar e estimar exposições deverá ser desenvolvido para uso em qualquer situação. Deverão facilitar a comparação entre sítios, e entre estudos usando diferentes sítios. Eles deverão ser capazes de definir as informações essenciais a serem coletadas e evitarão despesas desnecessárias na obtenção de informações que não seriam úteis na interpretação de uma situação do local.

### **3.1.2 EXPOSIÇÃO ÀS EMISSÕES PROVENIENTES DE ATERROS**

#### **UM SISTEMA PARA AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO**

É importante destacar que não é suficiente somente a presença de uma fonte de contaminantes para se ter uma situação de risco à saúde humana. É necessário um caminho de exposição completo estabelecido, isto é, a existência de uma fonte de contaminação, o meio e os mecanismos de transporte dos contaminantes, um ponto e uma rota de exposição, e uma população receptora.

É muito importante que se defina inicialmente as razões da necessidade de avaliação do estudo de exposição, o que inclui analisar:

- Solicitação da população ou atendimento aos seus padrões de saúde;
- Atendimento à legislação;
- Litígios;
- Proposta de mudança no uso do local;
- Pesquisa científica.

Cada mecanismo de motivação para a avaliação resulta em específicas questões e necessidades de informação, e o processo de avaliação deve ser adaptado para maximizar recursos e a satisfação com os resultados finais. A necessidade da comunicação clara do risco e, o mais cedo possível, do envolvimento da população nos estudos, são elementos essenciais no processo de avaliação.

#### **Etapas para avaliação de exposição**

Cinco etapas iniciais no processo de avaliação, antes de iniciar qualquer coleta de informações, se restringem à exploração das informações disponíveis, e que irão suportar as investigações posteriores e determinar o escopo dos estudos a seguir.

- 1) **Caracterização do sítio:** Usar todas as informações disponíveis para realizar a descrição da sua natureza e da sua vizinhança, revisar o potencial dos contaminantes de interesse existentes, e identificação da migração e das vias de transporte a partir do ponto de emissão. As questões principais que devem ser respondidas nesta etapa são:
  - a. Qual o uso normal do local?
  - b. Existem quaisquer informações da natureza dos resíduos existentes no aterro?
  - c. É um aterro realizado com técnicas de engenharia?
  - d. O local permite acesso à população em geral?
  - e. Existem substâncias contaminantes de interesse sendo emanadas do local?
  - f. Existem outras fontes de exposição próximas ao local?
- 2) **Caracterização dos receptores:** Realizar a descrição da população vizinha ao local e que está sob potencial risco de exposição. As seguintes questões são essenciais:
  - a. Qual o tamanho e a composição da população sob risco?
  - b. Quais são as características da população mais representativa sob risco?
- 3) **Caracterização dos caminhos de exposição:** Identificar os potenciais caminhos de exposição que criam uma rota de exposição para a população humana no local. Particularmente, as questões essenciais se relacionam à existência de recursos hídricos no local (águas superficiais ou subterrânea) e que são utilizados nas proximidades do aterro. A dispersão dos contaminantes através do ar também, e com muita relevância, deve ser considerada.
- 4) **Determinação da concentração dos contaminantes:** Usando os dados e informações disponíveis ou realizando amostragens, determinar as concentrações dos contaminantes dos diversos setores com os quais a população entra em contato, tal como o solo, o ar externo e interno às habitações, alimentos e água para uso doméstico ou para recreação próximos ao local do aterro ou

do ponto de exposição considerado. As questões essenciais são:

- a. Quais são as concentrações máximas?
- b. Esses níveis encontrados excedem os limites aplicáveis ou os padrões?

5) **Estimativas de exposição:** Realizar as estimativas de exposição usando os dados disponibilizados de concentrações, suas fontes e da população sob risco. Se a análise indica que existe um risco potencial de exposição para a população o qual deverá resultar em importância para a sua saúde, a necessidade de estudos ou ações complementares deverão ser consideradas. Se uma investigação especial é requerida para a avaliação da exposição, os métodos mais apropriados deverão ser escolhidos. Isto também dependerá das razões iniciais dos estudos de avaliação. Um maior detalhamento do local será necessário se o motivo da avaliação é de pesquisa científica. Uma avaliação motivada por uma mudança sugerida de utilização do local resultará na necessidade da extrapolação dos estudos de avaliação dos impactos ambientais e deverá concluir com a avaliação dos impactos à saúde humana.

Se ao final da realização das etapas acima a análise resultar em respostas negativas para as etapas 1, 2 e 3, é improvável que exista risco à saúde relativo à exposição ao aterro de resíduos em estudo, e o estudo de avaliação poderá ser interrompido. Caso contrário existe o risco e os estudos deverão ser concluídos.

## ETAPAS NA AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÕES HUMANAS A SÍTIOS DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS

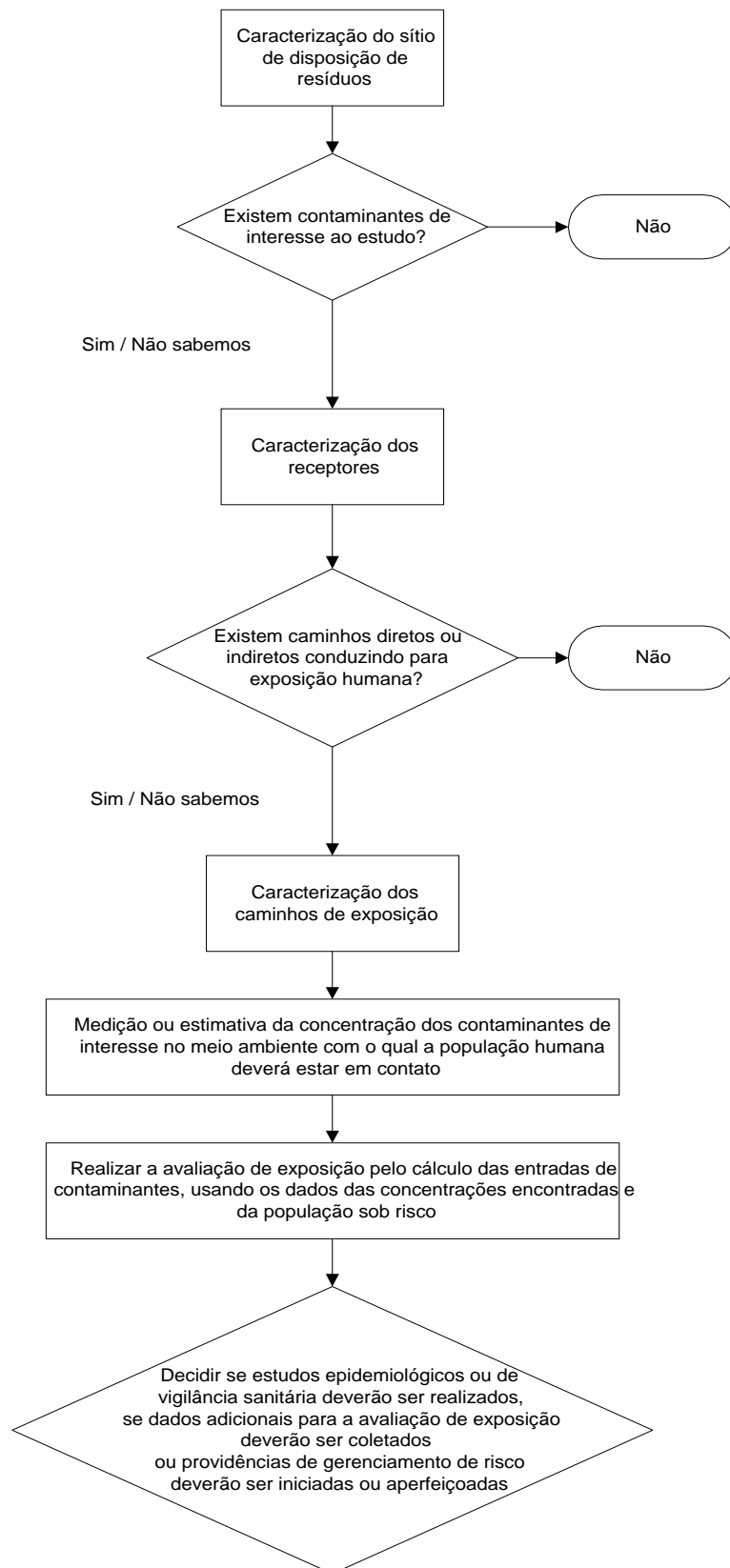


Figura 2 - Fluxograma da avaliação de exposição a aterros de RSU

## **CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO E DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DOS CONTAMINANTES**

Esta seção dá as diretrizes para a coleta de informações que caracterizam o sítio em questão e determina os níveis de contaminação dos meios ambientais relevantes pelo potencial de substâncias perigosas que emanam dos sítios. São listadas as categorias usuais de dados sobre o sítio, considerando os aspectos técnicos envolvidos nesta disposição de resíduos, e que são representadas por um número de contaminantes principais.

### **Áreas chaves de informação requerida para caracterização do sítio:**

As categorias importantes de dados incluem:

#### 1. Referente ao sítio de disposição dos resíduos:

- Natureza e qualidade dos resíduos depositados (tais como os perigosos ou os biodegradáveis) e há quanto tempo foram depositados;
- Como foi construído o sítio;
- Controles técnicos de engenharia ou naturais, incluindo selos/vedações, superfície de cobertura, sistema de coleta de gases;
- Monitoramento de dados dentro e no entorno do sítio;
- Presença e profundidade do nível de chorume;

2. Existência de atividades humanas na área do sítio em questão e dentro de um raio de dois quilômetros do sítio (dependendo da caracterização das emissões), plotado em mapa:

- Trabalhadores no sítio;
- Residências com ou sem jardins, assim como se elas possuem pavimentos abaixo do nível do terreno;
- Escolas e/ou jardins de infância;
- Áreas de recreação para crianças;
- Casas para repouso de idosos;
- Hospitais;
- Espaços abertos para uso da população;
- Áreas comerciais;
- Áreas industriais, observando os tipos de industriais e as possibilidades de emissões;

3. Atividades agrícolas no sítio e dentro de um raio de 1 km do sítio:

- Áreas onde existem plantações ou criação de animais para consumo doméstico;
- Áreas onde existem plantações para uso comercial;
- Áreas onde animais de fazenda podem ingerir vegetação (por ex., capim) ou solo, os quais podem sofrer exposição à contaminação (por ex., poeira);

4. A geologia, a hidrogeologia e a hidrologia do sítio, incluindo:

- A natureza da geologia no entorno do sítio, o tipo de fluxo predominante, isto é, se intergranular ou por fissuras, e a permeabilidade do solo da região, se alta ou baixa;
- Profundidade do lençol freático;
- Direção do lençol freático;
- Cursos d'água superficiais e suas ligações, se existirem, com o lençol freático;

5. Captação de água do subsolo num raio de dois quilômetros do sítio. Se a direção do fluxo do lençol freático é conhecido, identificar os pontos de captação localizados na região de gradiente hidráulico menor. Para cada ponto de captação de água observar:

- A profundidade e, se possível, a camada de solo de onde é captada a água;
- A taxa de captação – alta ou baixa;
- O uso da água, isto é, se para abastecimento público, privado, irrigação, uso ou resfriamento industrial, produção/manuseio de alimentos;
- Qualquer informação sobre a qualidade da água subterrânea;

6. Identificação dos cursos d'água superficiais e pontos de captação dessa água até dois quilômetros a jusante do sítio:

- Taxas de captação de água;
- Uso da água de superfície, ou seja, pescaria, banhos, mergulhos, criação de peixes;

- Uso da água captada, ou seja, abastecimento público, abastecimento pessoal, irrigação, uso ou resfriamento industrial, produção/manuseio de alimentos;
- Qualidade da água de superfície;

O mínimo necessário para o relatório de caracterização do sítio são as informações dos controles naturais e de engenharia existentes, os tipos de resíduos ou emissões, e os caminhos potenciais para exposição da população humana local. Fontes de dados disponíveis entende-se como incluindo relatórios geológicos e hidrogeológicos, dados de monitoramento do ar, da água e do solo, históricos do sítio, organizações da comunidade, e os órgãos públicos locais e regionais responsáveis pela preservação do meio ambiente.

Na execução de um relatório do sítio é importante revisar todas as possibilidades de caminhos de exposição. Por exemplo, se metano é produzido no sítio, é importante considerar a dispersão do gás pelo ar (inalação) ou através do transporte lateral pela massa dos resíduos, resultando em situações potenciais de explosividade em residências e outras edificações. A direção e o fluxo de água e ar provenientes do sítio devem ser todas documentados.

#### **Contaminantes de interesse:**

Os seguintes grupos de substâncias devem ser considerados nas investigações de sítios de resíduos:

- Metais;
- Hidrocarbonetos totais de petróleo;
- Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos;
- Outros hidrocarbonetos aromáticos;
- Hidrocarbonetos clorados;
- Bifenilas policloradas;
- Pesticidas;
- Metano;
- Dioxinas;
- Asbestos;
- Resíduos farmacêuticos;
- Resíduos patogênicos;

Essas substâncias são definidas como poluentes prioritários com base em toxicidade, persistência ambiental e mobilidade, bioacumulação e outros perigos tais como explosividade, e, como indicado, podem estar presentes em um ou mais meios de exposição (ar, água, solo, subsolo). Esta lista deverá ser usada como indicativa somente enquanto uma lista de contaminantes específicos do sítio não for definida.

Quando investigando os limites da área em questão buscando identificar potenciais receptores, um raio de 1 a 2 quilômetros deve ser utilizado, podendo esta distância ser maior ou menor conforme a caracterização preliminar das emissões provenientes do sítio. Entretanto, é importante levar em consideração que alguns meios de exposição podem resultar numa rota de exposição indireta para as populações humanas mesmo a longas distâncias do sítio. Por exemplo, se poços de água para beber ou sistemas de abastecimento de água estão contaminados, mesmo que essa população resida fora do raio considerado, uma investigação de caminho de exposição deverá ser realizado.

### **Estimativa da concentração dos contaminantes**

Não foi um propósito do workshop referenciado discutir em detalhes métodos de determinação da concentração de substâncias que possuem potencial de emissão dos sítios de resíduos. Entretanto isso é uma parte essencial da investigação dos problemas potenciais, e é aconselhável ser realizado por especialistas no assunto.

É sugerido que:

Dados de fontes facilmente disponíveis deverão ser utilizados onde possível;

Se as informações disponíveis são limitadas ou não possuem dados confiáveis, novas medições deverão ser realizadas;

Freqüentemente são necessárias sondagens e perfurações para:

- Investigar a estrutura geológica;

- Investigar a profundidade das zonas saturada e não-saturada;

- Investigação da profundidade, gradiente e direção do fluxo do lençol freático;

- Obter amostras do lençol freático;

- Obter amostras dos resíduos e do chorume;

Dependendo das propriedades físico-químicas dos contaminantes, amostras de gases emitidos deverão ser obtidas dentro e fora do sítio, levando em conta a direção predominante dos ventos e incluindo o interior de construções e espaços fechados nos arredores do sítio.

Deverá ser medida a contaminação da água subterrânea com o chorume proveniente dos resíduos, levando em conta o uso da água subterrânea em condições locais e regionais;

## **CARACTERIZAÇÃO DA POPULAÇÃO**

Os seguintes dados da população serão necessários para realizar a investigação para a avaliação da exposição:

- Localização geográfica da população e as distâncias do sítio;
- Dados básicos demográficos tais como o número de homens e mulheres nos diferentes grupos de idade;
- Padrões de trabalho da população local, incluindo áreas industriais e as rotas preferenciais da população;
- Localização de escolas e outros estabelecimentos educacionais, hospitais e outras construções com grande número de residentes ou usuários;
- Localização de instalações de lazer e os padrões de utilização;
- Presença ou proximidade de grupos potencialmente sensíveis tais como crianças ou idosos, e pessoas com doenças crônicas;
- Comportamento da população com relação ao consumo da produção local;

## **IDENTIFICAÇÃO DOS CAMINHOS COMPLETOS DE EXPOSIÇÃO**

Para a seleção dos potenciais caminhos de exposição e dos meios pelos quais ocorre a contaminação, deverão ser utilizados checklists que incluirão o que segue:

- Contaminação via inalação:
  - Ar ambiente no sítio;
  - Ar no interior das residências;
  - Poeiras sedimentadas;
- Contaminação via ingestão:
  - Água potável para consumo humano;
  - Solos;
  - Alimentos (vegetais e carnes)
  - Água de superfície e sedimentos (com referência ao uso recreativo);

- Contaminação via absorção dérmica:
  - Contato direto com os resíduos;
  - Contato com solos contaminados;
  - Contato com água contaminada;

As características completas da população exposta, coletadas conforme o checklist da seção correspondente, deverão ser completadas para cada meio de contato acima relacionado, onde for apropriado.

## **ESTIMATIVA DA EXPOSIÇÃO**

O processo de seleção acima resumido deverá facilitar a construção de uma matriz de caminhos de exposição e dos meios de contaminação, assim como dos dados de caracterização da população. Para aqueles caminhos de exposição completamente caracterizados, dados de exposição deverão ser também obtidos a partir de fontes facilmente disponíveis ou por amostragens adicionais. Um exemplo desse procedimento é apresentado a seguir para uma estimativa de exposição decorrente da água subterrânea poluída:

### **Exemplo:**

Existindo uma suspeita, ou dados disponíveis que indiquem o potencial de poluição da água subterrânea por substâncias que emanam do sítio de resíduos, as seguintes vias de exposição e meios de contato deverão ser considerados para avaliar o risco em potencial para a saúde humana devido à poluição:

#### (a) ingestão:

- fontes de água potável para beber, particularmente captadas no local;
- alimentos – produção local de vegetais e de animais para abate;
- água de superfície e sedimentos;

#### (b) inalação:

- ar no interior das residências, principalmente se o poluente é volátil;

#### (c) contato dérmico:

- através da água para uso doméstico;
- prática de natação nas águas superficiais;

Informações deverão ser coletadas das características das populações potencialmente expostas através dessas vias de exposição, conjuntamente com dados

disponíveis das concentrações dos contaminantes de interesse, assim como as condições ambientais do sítio.

Valores padrão estão disponíveis para as condições de inalação de ar ambiente e ingestão de solos. Dados para alimentos e água e contato dérmico requerem informações mais detalhadas (provavelmente obtidas pela aplicação de questionários ou entrevistas com a população) tais como o consumo de alimentos obtidos no local, fontes de água para beber etc. e atividades padrão da população. As concentrações das substâncias identificadas nos meios de contato considerados como relevantes podem então ser combinadas/confrontadas com as informações padrão disponíveis, para providenciar uma estimativa completa da exposição.

As estimativas de exposição para caminhos específicos de contato, deverão ser comparadas com as diretrizes disponíveis ou com padrões. Divulgações apropriadas e bem elaboradas deverão ser criadas para avaliar o impacto potencial na população das estimativas de exposições identificadas. Se os impactos são considerados inaceitáveis mas existe incerteza quanto a ações imediatas de remediação, a obtenção de dados ou informações adicionais será necessária para facilitar uma avaliação mais consistente de exposição. Cada investigação, usando as abordagens apresentadas a seguir, pode requerer um envolvimento técnico especializado. Se um incremento no nível de risco é indicado pelos dados coletados, as medidas necessárias e imediatas de gerenciamento de risco deverão ser melhoradas ou iniciadas. Novas avaliações das exposições assim como uma vigilância e monitoramento da condição da saúde humana da população exposta, deverá seguir esta ação.

## **MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DE EXPOSIÇÕES**

É apresentada a seguir uma descrição das abordagens e terminologias básicas utilizadas nas avaliações de exposição.

### **□ medição da exposição**

Exposição é definida como o contato, no tempo e no espaço, entre uma pessoa e um ou mais agentes biológicos, químicos ou físicos. A avaliação de exposição identifica e define as exposições que ocorrem, ou que são antecipadas para ocorrer, nas populações humanas. Exposição é definida pela concentração de um agente ambiental num meio de transporte no meio ambiente, no ponto de contato com o corpo humano, junto com a duração do contato. Para pequenas exposições é usual estimar a soma das concentrações instantâneas ao longo do tempo; para longas durações de

exposição (meses ou anos), exposição é usualmente representada por uma concentração média ao longo do período de exposição.

Abordagens de avaliação quantitativa de exposição podem ser classificadas em duas categorias: método de avaliação direta (medida) e de avaliação indireta (estimada). Essas duas abordagens são independentes e complementares. Cada um resulta em diferentes tipos de dados e tem diferentes pontos fortes e pontos fracos. É muito importante e útil, entretanto, empregar múltiplas abordagens de forma a checar a representatividade dos resultados.

□ **Abordagem pelo método direto:**

Métodos diretos incluem medidas das concentrações do agente na interface entre o meio de exposição e o corpo humano. A coleta de dados por monitoramento personalizado ou usando indicadores biológicos de exposições é realizada para todos os indivíduos participantes do estudo.

Monitoramento personalizado ou individual pode ser realizado, em princípio, para todos os meios potenciais de exposição (ar, água, solo, alimentos). Entretanto, existem várias limitações para essa abordagem. Métodos de coleta de amostras que sejam sensíveis, fáceis de realizar, com respostas rápidas, livres de interferências e de baixo custo, não são facilmente disponíveis. Também deverá ser considerado da inconveniência que o cumprimento do protocolo de monitoramento pessoal (individual) poderá vir a alterar o comportamento normal dos participantes do estudo. Métodos de monitoramento pessoal (personalizado) incluem o seguinte:

- Para exposições de inalação, o uso de monitores pessoais de poluição do ar. Os dispositivos de amostragem devem ser do tipo passivo (por exemplo, tubo de difusão para amostragem de gases tais como os VOCs), ou ativos, com ar bombeado através de um filtro para coleta de aerossóis e seus componentes. Eles podem coletar o ar ao longo de um período e são então levados para análise em laboratório (amostradores integrados) ou podem conter um sistema analítico para medir e registrar imediatamente a concentração dos poluentes (amostradores contínuos).
- Para exposições alimentares, a contaminação nos alimentos pode ser medida através da coleta de refeições preparadas para consumo pelos membros da população em estudo (porções de amostras duplicadas). As amostras também incluirão quaisquer bebidas consumidas (por exemplo, água de bicas se ela é consumida sem antes ferve-la).
- Para exposições dérmicas, raspagens da pele e limpeza esfregando deverão ser utilizadas para transferir os poluentes depositados na pele

das pessoas (isto é, resíduos de pesticidas provenientes do solo). Para avaliação da exposição dérmica durante o banho deverá ser medida a concentração dos poluentes na água do banho, junto com a duração do contato com a água contaminada.

Um bioindicador de exposição é definido como uma substância xenobiótica, ou é metabolite(s), ou o produto de uma interação entre um agente xenobiótico e alguma molécula ou célula alvo que é medida numa parte de um organismo humano. Eles podem representar exposições passadas, recente exposição a uma fonte externa (e.g. VOCs na respiração exalada) e, mesmo, fontes de exposição internas futuras (e.g. existência de pesticidas nos tecidos adiposos). Entretanto, até hoje, muito poucos bioindicadores têm sido efetivamente utilizados para avaliações quantitativas de exposição ambiental a contaminantes. Na maioria dos casos eles provem qualitativa ou semiquantitativa indicações para o monitoramento de tais exposições. Uma desvantagem dos indicadores biológicos de exposição é a dificuldade em caracterizar as diferentes fontes de exposição que contribuem para a exposição total subjetiva.

#### □ **Abordagens indiretas para a estimativa de exposições**

Métodos indiretos incluem monitoramento ambiental da poluição em (micro) locais onde exposições ocorrem, desenvolvimento de modelos de exposições individuais ou da população, e a coleta de informações usando métodos qualitativos tais como o uso de questionários de inspeção.

#### □ **Monitoramento ambiental**

Estimativas de exposição baseadas numa abordagem indireta são feitas pela combinação das medições das concentrações de poluentes em sítios determinados com informações de suas taxas de contato com esses meios, registrados em *data logs* e diários ou de inspeções de atividades ao longo do tempo desenvolvidas no local.

Exemplos:

- Dados de poluição do ar em locais específicos combinados com registros de atividades ao longo do tempo no local;
- Dados de contaminação de alimentos combinados com informações de hábitos alimentares;
- Concentração de poluentes na pele com dados de frequência e duração da fase de contato tipo mão-na-boca;

Ainda que a coleta de dados ambientais, das atividades desenvolvidas no local e questionários a aplicar para essa abordagem, são mais simples do que o monitoramento do indivíduo, são mais invasivas e laboriosas mas podem se constituir numa tendência de abordagem.

#### □ **Modelagem**

Modelos são ferramentas úteis para a descrição quantitativa das relações entre exposição e importantes variáveis explanatórias. Eles também são úteis para extrapolação das informações de exposição para estimativa para novas populações, ou para situações futuras de exposições baseadas em certos cenários. Em adição aos modelos de exposição determinísticos, são utilizados também modelos probabilísticos e estatísticos. Modelos de exposição validados reduzem a necessidade de programas dispendiosos de medições. Entretanto, o desafio é desenvolver bases de dados de exposições assim como o desenvolvimento de modelos que permitam a máxima extrapolação com um mínimo de medições e custos.

#### □ **Questionários**

Questionários resultam qualitativas, freqüentemente retrospectivas, informações das exposições potenciais e têm sido utilizados como ferramenta primária para avaliação de exposição em muitos estudos epidemiológicos. Eles também são úteis para a interpretação dos resultados do monitoramento pessoal ou ambiental. Conhecimento prévio dos determinantes e das condições que influenciam a exposição é necessário para o projeto dos questionários, os quais são freqüentemente utilizados para coletar os dados dos indicadores representativos da exposição. Dados dos padrões de atividades dos indivíduos e populações serão utilizados como *input* para modelos, e para combinação com dados de monitoramento micro-ambiental, também podem ser obtidos por essa maneira.

### **3.1.3 INVESTIGAÇÕES EPIDEMIOLÓGICAS**

Apresentam-se a seguir as diretrizes para a análise e decisão de quando um estudo epidemiológico deverá ser realizado, assim como para escolher um sistema adequado, e decidindo quais informações deverão ser coletadas.

#### **QUANDO INVESTIGAÇÕES EPIDEMIOLÓGICAS DEVERÃO SER REALIZADAS**

Revisões de estudos epidemiológicos indicaram que existe um potencial para efeitos adversos à saúde humana de população residindo próximo de determinados sítios de disposição de resíduos, destacando-se alguns trabalhos tais como, de Dolk et al. (1998), Vrijheid et al. (2002), e outros. No entanto a exposição é geralmente muito mal caracterizada nos estudos epidemiológicos antigos, o que constitui a principal limitação para o estabelecimento das relações causais.

Investigações epidemiológicas futuras são recomendadas somente quando a caracterização de sítios e populações, caracterização das vias de exposição, monitoramento ambiental e/ou estimativas de exposições tenham indicado a provável existência de um caminho completo de exposição, isto é, fonte - via de exposição - receptor.

Quando um caminho completo de exposição é estabelecido num sítio de interesse, resulta que existirão várias alternativas para desenvolver esses estudos. Uma investigação ambiental é somente uma delas. Outras opções serão, conduzir avaliação de risco/impacto à saúde humana, ou então sistematizar ações de vigilância sanitária. Vigilância sanitária é um sistema de rotinas para relatar casos dentro dos sistemas existentes de controle da saúde. A análise dos dados obtidos deverá indicar se existe um aumento significativo no número dos casos de interesse. Uma rede de vigilância de indicadores de saúde, estabelecida próxima ao sítio de resíduos observará a população alvo e notificará quando alguma outra investigação ou ação deva ser realizada. Uma avaliação de risco à saúde objetiva caracterizar qualitativamente e/ou quantitativamente os riscos à saúde relacionados a um sítio específico, baseados nas concentrações dos contaminantes emanados, suas vias de exposição, e dos seus perfis toxicológicos. Já uma avaliação dos impactos à saúde possui procedimentos similares à avaliação de riscos, mas naquilo que se refere a informações de possíveis impactos à saúde. Este tipo de avaliação é cada vez mais requerida como parte das avaliações de impacto ambiental de projetos tais como a abertura de novos sítios de disposição de resíduos.

O método escolhido para determinação de padrões depende do propósito do estudo de saúde, ou seja:

- Para avanço no conhecimento científico com respeito aos aspectos causais: estudo epidemiológico;
- Para definir prioridades do interesse da saúde pública: vigilância de saúde;
- Para apoiar os processos das decisões de execução, como por exemplo com relação à remediação do sítio, quando respostas rápidas são necessárias: avaliação de risco à saúde;
- Para propósitos regulatórios: avaliação dos impactos à saúde é cada vez mais requerida como parte essencial dos estudos de impactos ambientais durante ou após a execução dos projetos de grande infraestrutura.

## **TIPOS DE ESTUDOS EPIDEMIOLÓGICOS A SEREM REALIZADOS**

Existem vários tipos de estudos epidemiológicos desenvolvidos, incluindo entre os principais:

- Estudos transversais;
- Estudos ecológicos;
- Estudos de coorte, ou estudos longitudinais
- Estudos de caso-controle;

Esses tipos de estudos serão descritos a seguir junto com a descrição de possíveis fontes de tendências. Assuntos para estudos específicos de riscos/impactos à saúde de sítios de resíduos foram selecionados em função dos resultados de saúde a estudar, da utilização de estudos simples ou do tipo multi-sítio, e utilização de tipos específicos de investigações.

Os seguintes projetos de estudos têm sido utilizados para estudar os efeitos para a saúde próximo aos sítios de disposição de resíduos:

### **□ Estudos tipo corte transversal, ou dos perfis de saúde:**

Avalia o status de um indivíduo com relação à presença ou ausência de ambos, exposição e doença, num mesmo período. Desde que exposição e doença sejam avaliados no mesmo período de tempo, estudos de perfis não podem distinguir se a exposição precedeu a doença ou não. Dessa forma não é adequado para testar uma

hipótese. Projetos de estudos de perfis não são recomendados para estabelecer se existe uma relação causal entre exposição a sítios de disposição de resíduos e efeitos adversos à saúde humana. Os estudos de perfis podem ser usados quando existe a necessidade para, rapidamente, avaliar dados predominantes ou para estabelecer graduações de exposição dentro de uma população.

□ **Estudos Ecológicos, ou de comparação geográfica:**

Correlacionam taxas de doenças com exposição a resíduos perigosos, com bases geográficas. Esses estudos requerem relativamente poucos recursos devido a que eles usam dados rotineiramente disponíveis. Um exemplo de comparação geográfica é a análise das taxas de mortalidade para municípios que possuem aterros de resíduos sólidos com as taxas médias de um país inteiro. A maior limitação dessa abordagem é que ela não leva em conta as diferenças individuais no que se refere à exposição ou a fatores de confusão. Estudos de comparações geográficas são úteis na geração de hipóteses, as quais deverão posteriormente necessitar confirmação de estudos baseados em dados individuais.

□ **Estudos de coorte, ou de acompanhamento:**

Nesses estudos os indivíduos para os quais tenha havido suspeita de exposição a substâncias perigosas, são monitorados ao longo de sua vida, e suas incidências de doenças são comparadas com as de um grupo que não foi exposto. Nesse caso as informações da incidência de doenças ou problemas de saúde podem ser coletadas prospectivamente ou por análise histórica. Em relação aos sítios de disposição de resíduos sólidos municipais, estudos de monitoramento têm sido principalmente históricos: uma população exposta (ou seja, residentes próximos ao sítio) e uma população não exposta (residentes em qualquer outro local) são definidas num período de tempo anterior e informações sobre a incidência de doenças ou problemas de saúde são coletadas desde o início da exposição até o presente. Para o propósito de estabelecer nexos causais é recomendado o uso de estudos de monitoramento prospectivo sempre que possível. Estudos prospectivos são úteis para o estudo de resultados de saúde com relativos pequenos períodos de latência tais como problemas na gravidez ou leucemia infantil. Outros resultados de saúde, tais como alguns cânceres, irão requerer um maior tempo de acompanhamento. Definição precisa dos grupos expostos é essencial para projetar os estudos de acompanhamento prospectivo. Estudos de acompanhamento retrospectivo podem ser úteis para estudar resultados de saúde para casos de longa latência tais como a maioria de tipos de cânceres e devem ser realizados somente quando boas informações e estimativas de exposição estiverem disponíveis.

□ **Estudos tipo caso-controle:**

Esses estudos iniciam com a identificação de um grupo de Casos – indivíduos que tenham desenvolvido uma doença de interesse ao estudo, e um grupo de Controle, indivíduos que não tenham a doença. Suspeita de exposição a substâncias perigosas no passado é então comparada entre os dois grupos. Estudos do sítio de disposição de resíduos, por exemplo, têm comparado a distância da residência até o sítio de resíduos ou relatórios de exposição para casos de certa doença e os controles de saúde existentes. As dificuldades nos estudos caso-controle são a seleção de controles adequados e uma não tendência de averiguação das exposições passadas, particularmente quando a exposição é estabelecida por recordações pessoais. Estudos de caso-controle são extremamente úteis para resultados raros de saúde. Nos estudos de caso-controle ocorridos no passado, a avaliação da exposição tem freqüentemente sido baseada em medidas extrapoladas de exposição e é recomendável para futuros estudos o uso de medições mais precisas de exposição onde possível, para permitir erros de classificação da exposição.

□ **Estudos singulares ou multi-sítios**

Estudos epidemiológicos de sítios de disposição de resíduos podem ser divididos naqueles que estudam os resultados de indicadores em um único sítio, e outros que estudam os indicadores nas proximidades de muitos sítios de disposição de resíduos. Os estudos para sítios únicos são geralmente utilizados para situações relativamente comuns de resultados de saúde, como por exemplo efeitos respiratórios, ou em situações onde o sítio é localizado numa área de alta densidade populacional. Os estudos para múltiplos sítios são recomendados para o estudo de casos raros de saúde, como por exemplo cânceres e desordens reprodutivas. É geralmente mais difícil e requer mais recursos para coletar informações detalhadas do sítio e das características populacionais e sua exposição, quando muitos sítios são incluídos no estudo. Estudos de múltiplos sítios têm a vantagem de permitir a investigação de gradientes de exposição (comparando alta, média e baixa exposição entre sítios com contaminantes similares). O estabelecimento de um gradiente exposição-resposta é especialmente válido na avaliação causal.

## **POSSÍVEIS FONTES DE ERROS**

As seguintes fontes possíveis de erros especialmente relatadas para o estudo de sítios de disposição de resíduos deverão ser consideradas para o estágio de projeto do estudo. Se eles não forem eliminados nesse ponto do estudo, tendências não poderão ser ajustadas para o estágio de análise do estudo.

### **□ Tendências de erros de classificação**

Tendências de erros de classificação de exposições ocorrem se populações expostas são classificadas como não-expostas e vice-versa. Isto é freqüentemente devido às incertezas das informações utilizadas. Quando tal erro de classificação é casual, isto é, quando os efeitos doentes e não-doentes da população têm a mesma extensão, normalmente decresce a representatividade do estudo para encontrar o verdadeiro efeito na saúde, e a tendência do risco verdadeiro tornar-se nulo. Erros não-casuais de classificação de exposição podem tanto superestimar quanto subestimar o risco relativo. Por exemplo, uma tendência de erro de classificação de exposição é a tendência de migração das pessoas. Quando a exposição é medida no período do diagnóstico da doença, pessoas podem ter migrado para dentro ou para fora da área de exposição entre o período de exposição e o período do diagnóstico, o que resultará num erro de classificação da exposição.

### **□ Tendências nos relatos e recordações**

Estudos que confiam nas informações relatadas pelos indivíduos dos grupos entrevistados podem sofrer na sua qualidade pela tendência natural dos casos reportados. Essa tendência pode também diferir entre subgrupos e indivíduos. Por exemplo, pessoas morando próximo de sítios de resíduos podem lembrar de problemas de saúde melhor do que outras pessoas e, portanto, relatar uma incidência maior de doenças. Num estudo de caso-controle, pessoas que tenham adoecido estarão mais motivadas para lembrar de exposições passadas do que os indivíduos do grupo de controle.

## □ **Tendências ocorridas por seleção**

Tendências por seleção ocorrem quando as relações entre exposição e doença são diferentes para aqueles que participam e aqueles que teoricamente foram escolhidos para o estudo. Os fatores de seleção para participação deverão ser os mesmos, tanto quanto possível, para os indivíduos escolhidos para Caso e para Controle.

## **ESCOLHA DOS INDICADORES DE SAÚDE**

A escolha de quais os indicadores de saúde a usar no estudo dependerá do perfil toxicológico das substâncias às quais a população está exposta (como definido na caracterização, no monitoramento ambiental e medida da exposição). Considerações deverão incluir as concentrações dessas substâncias, o tempo de exposição, os períodos de latência e os caminhos de exposição. A prioridade deverá ser dada aos sete maiores grupos de indicadores de saúde listados pela Agency for Toxic Substances and Disease Registry (Report to Congress 1993, 1994, 1995. Atlanta), com base na revisão da literatura toxicológica e epidemiológica.

- Defeitos de nascença e desordens reprodutoras;
- Câncer em partes específicas do corpo humano;
- Desordens de funções imunológicas;
- Disfunções renais;
- Disfunções hepáticas;
- Doenças pulmonares e respiratórias;
- Desordens neurotóxicas;

O interesse público e a qualidade dos dados disponíveis deverão ser sempre levados em consideração quando da escolha dos indicadores para o estudo epidemiológico. Entretanto, em geral, pressões públicas ou políticas sozinhas, não determinarão a escolha de indicadores de saúde ou se um estudo deverá ser realizado. Hipóteses partindo de informações sobre os perfis toxicológicos melhorarão o valor científico de um estudo.

## **TIPOS ESPECÍFICOS DE INVESTIGAÇÃO QUE PODEM COMPROVAR ESPECIAL VALOR**

No planejamento de um estudo epidemiológico de sítios de disposição de resíduos sólidos, os seguintes projetos deverão ser considerados como potencialmente os que poderão dar os melhores resultados:

- **COMPARAÇÕES ANTES E APÓS:** Esses têm sido extremamente úteis na interpretação de estudos do passado, por exemplo incluindo um período antes do início de operação ou utilização de um sítio de disposição de resíduos assim como o período após o seu encerramento, ou então a investigação antes e após a remediação de um sítio;
- **ESTUDOS DAS POPULAÇÕES VULNERÁVEIS:** São os grupos da população prováveis de desenvolver efeitos adversos a níveis mais baixos de exposição do que a população em geral. Por exemplo, fetos durante a gestação, bebês, crianças, e pessoas idosas;
- **ESTUDOS DE POPULAÇÕES COM ALTA EXPOSIÇÃO:** Por exemplo crianças (devido ao contato com solo contaminado), trabalhadores, pessoas que se alimentam de produções locais, etc.

## **DADOS REQUERIDOS PARA ESTUDOS EPIDEMIOLÓGICOS**

### **□ avaliação da exposição**

Em todos os projetos de estudos discutidos acima, validar a avaliação da exposição é essencial. Várias abordagens estão disponíveis para avaliação da exposição de populações humanas às substâncias contidas em sítios de resíduos. O U.S. National Research Council tem mostrado a hierarquização da qualidade de dados para as diferentes avaliações de exposições. Muitos estudos têm utilizado abordagens focando a hierarquização tal como a proximidade residencial ao sítio ou residência na área geográfica que contém o sítio. Objetivando um avanço no conhecimento científico é muito recomendável que as abordagens com fundamentação no topo da lista sejam utilizadas nas futuras investigações epidemiológicas.

- 1) Quantificação, para cada indivíduo, das medições e estimativas, isto é, um monitoramento pessoal ou biológico;

- 2) Quantificação das medições e estimativas da área ou ambiente onde está o sítio em questão. (modelagem e/ou monitoramento ambiental) nos arredores das residências ou outros sítios em atividade;
- 3) Quantificação substituta (alternativa) da exposição (por exemplo, estimativas do uso da água potável);
- 4) Distâncias das residências ao sítio assim como o tempo de deslocamento até o local;
- 5) Uso residencial ou ocupação na área geográfica na proximidade do sítio onde a exposição possa ser considerada;
- 6) Uso residencial ou ocupação numa área geográfica definida, como por exemplo, no município onde está contido o sítio.

□ **Identificação de fatores de confusão**

Ocorre confusão quando a exposição de interesse é associada com algumas outras características que são também fatores de risco para as doenças de interesse do estudo. Por exemplo, a incidência de câncer de pulmão pode ser aumentada em pessoas que residem na proximidade de um incinerador somente porque eles fumam mais do que a média da população. Técnicas analíticas estão disponíveis para levar em consideração ou realizar ajustes para os efeitos de potenciais fatores de confusão. Onde disponível, informações sobre fatores de confusão devem ser coletadas num nível individual para permitir ajustes detalhados tanto quanto possível. A listagem seguinte mostra fatores de confusão que devem ser levados em consideração quando estudamos exposições a sítios de disposição de resíduos:

- Outras fontes de exposição ambiental (como por exemplo, indústrias próximas);
- Exposição por fatores ocupacionais de trabalhadores;
- Histórico residencial;
- Status sócio-econômico;
- Fatores de risco resultantes do estilo de vida dos indivíduos, como por exemplo, fumar cigarros;
- Características demográficas (idade, sexo);
- Fatores de risco específicos aos indicadores ( por exemplo, o histórico reprodutivo quando estudando indicadores de reprodução);

#### □ **Definição de indicadores biológicos dos efeitos na saúde**

Em qualquer investigação epidemiológica é essencial possuir uma definição detalhada dos indicadores a serem estudados. Diagnóstico e classificação dos indicadores de saúde devem ter importante consideração no estudo.

O uso de indicadores biológicos para avaliação de riscos à saúde decorrentes da exposição às substâncias emitidas por sítios de disposição de resíduos pode ser uma ferramenta muito importante nos estudos epidemiológicos. Indicadores biológicos dos efeitos na saúde podem ser utilizados como indicadores:

- a. Uma alteração num tecido humano ou órgão;
- b. Um evento precoce num processo biológico que é preditivo de uma deterioração da saúde;
- c. Uma deterioração da saúde ou reconhecimento clínico de uma doença;
- d. Um reflexo periférico, ou paralelo com um processo de uma enfermidade, mas correlacionado com ela;
- e. Outros monitoramentos biológicos utilizados nos estudos de sítios de resíduos;

Nos estudos dos efeitos na saúde decorrentes de sítios de disposição de resíduos, a prioridade na seleção de bioindicadores dos efeitos deve ser dada para aqueles capazes de detectar sinais precoces dos efeitos na saúde, e aqueles mais freqüentemente encontrados na associação com a exposição às emissões de sítios de resíduos.

Antes de iniciar os estudos de campo nos quais os bioindicadores serão utilizados, para efeito de economicidade do projeto fazer uma avaliação crítica da adequação dos indicadores selecionados para o estudo. Cada avaliação deverá ser baseada na análise de sensibilidade com base estatística dos indicadores biológicos para tecidos humanos específicos ou funcionais, e *health endpoints* para detectar alterações. O monitoramento biológico efetivo depende da disponibilização de técnicas analíticas de sensibilidade, precisão e acurácia, para medir os indicadores biológicos. Em complementação, a coleta de espécies deverá ser rigorosamente padronizada de forma a minimizar a variação de amostragens. Indicadores biológicos deverão ser validados antes de sua utilização nos processos de avaliação de risco pelo estabelecimento do relacionamento entre o bioindicador, a exposição e o resultado de saúde.

#### **3.1.4 RECOMENDAÇÕES**

- 1) Avaliações de exposições devem ser realizadas por uma equipe multidisciplinar com experiência adequada;
- 2) Usar métodos acessíveis e transparentes de comunicação de todas as etapas de qualquer investigação devem ser utilizados;
- 3) A avaliação de exposição deve ser realizada em cinco etapas:
  - a. Usando toda a informação corrente disponível, realizar a caracterização do sítio descrevendo a natureza do sítio e de seus arredores, e o uso atual da área, revisando os contaminantes potenciais de interesse e identificando as vias de migração ou transporte a partir do ponto de emissão;
  - b. Realizar a caracterização dos receptores descrevendo a população dos arredores sob risco potencial de exposição;
  - c. Identificar potenciais caminhos completos de exposição os quais criam uma rota de exposição para a população humana;
  - d. Usando dados disponíveis ou pela realização de amostragens, determinar a concentração dos contaminantes nos compartimentos ambientais com os quais as pessoas estão em contato com o solo, o ar interno e externo dos ambientes residenciais, com alimentos e água nos limites do sítio ou nos pontos de exposição;
  - e. Realizar a avaliação de exposição usando dados obtidos e utilizados de concentrações e da população sob risco;
- 4) Para a abordagem em dois estágios para a coleta de informações da exposição e do sítio deverão ser utilizados:
  - a. Usando dados de fontes facilmente acessíveis;
  - b. Realizando medições complementares de ar, água, solo e alimentos;
- 5) Se um sítio com atividades já encerradas é reusado ou uma mudança de utilização é proposta, uma avaliação de risco deverá ser utilizada;
- 6) Muito cuidado deverá ocorrer para que uma investigação realizada no sítio não venha permitir uma nova contaminação do meio ambiente;
- 7) Documentos indicando o uso da área como um sítio de disposição de resíduos devem ser mantidos com a documentação relativa à propriedade da área pela administração local para garantir que o sítio não seja utilizado numa outra finalidade;

- 8) Métodos padronizados de análise e avaliação deverão ser utilizados para facilitar a comparação com outros sítios;
- 9) Investigações epidemiológicas somente deverão ser consideradas se caminhos estabelecidos de exposição tiverem sido claramente caracterizados;
- 10) O uso de vigilância de saúde, avaliação de riscos à saúde e avaliação de impactos à saúde podem ser consideradas como opções alternativas para uma investigação epidemiológica;
- 11) Resultados de saúde apropriados para estudo devem ser escolhidos após consideração do perfil toxicológico das substâncias de interesse;
- 12) O projeto de um estudo epidemiológico deverá refletir o principal propósito do estudo;
- 13) Níveis e tempos de exposições, período de latência, estrutura populacional (incluindo potenciais grupos vulneráveis) e qualidade dos dados da exposição e fatores de confusão deverão ser considerados quando da escolha de um projeto apropriado para um estudo epidemiológico;
- 14) Se biomonitoramento é considerado, bioindicadores tanto da exposição quanto dos efeitos deverão ser cuidadosamente selecionados para detectar exposição e sinais precoces de desordens de saúde.

## 4 ESTUDO DE CASO – ATERRO DE PARACAMBI - RJ

### 4.1 AVALIAÇÃO DA ÁREA DO ATERRO DE RESÍDUOS

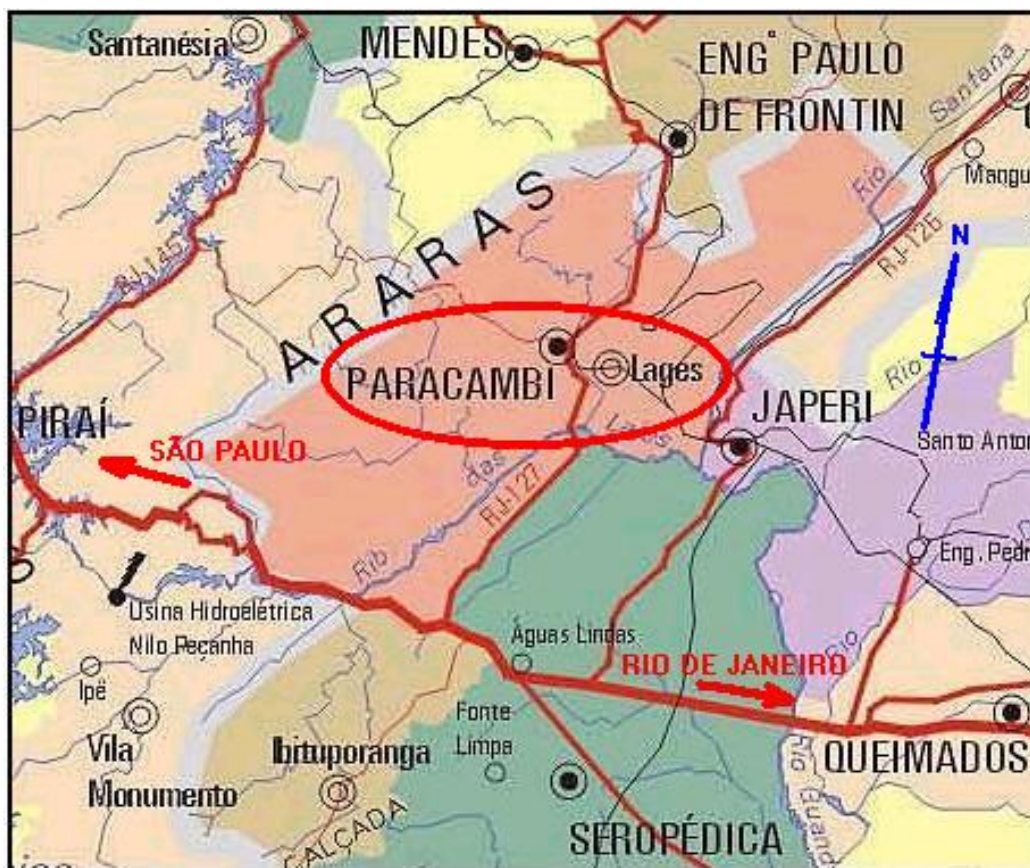


Figura 3 - Localização do município de Paracambi/RJ

#### 4.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO:

##### 4.1.1.1 USO NORMAL DO LOCAL

O local em estudo é utilizado para disposição dos resíduos sólidos urbanos desde o início dos anos 1960, portanto há mais de 40 anos. Atualmente o aterro possui algum tipo de controle que permite a orientação de onde dispor os resíduos recebidos e como recobri-los. Existem catadores no local mas não são permitidas crianças e nem residências ou barracos. Existe a presença de vigilantes junto às edificações ainda existentes no local e uma cerca de tela de arame galvanizado junto à rodovia asfaltada. No entanto não existe nenhum portão ou vigilância que impeça a entrada de estranhos, principalmente pelo lado oeste do aterro, limitado pela ferrovia e residências. Ocupa uma área de aproximadamente 38.000 m<sup>2</sup> (março 2005), e está localizada junto à estrada Emilio Zahur, asfaltada, que liga o Centro de Paracambi ao bairro de Lages e a

Japeri, pela RJ-093. Nesta área, além da disposição dos resíduos sólidos, existe a operação em caráter precário do que restou de uma Usina de Reciclagem de resíduos, inaugurada em 29/11/1992, conforme placa ainda no local, e que funcionou até 1995. Esta operação residual consiste somente da separação dos plásticos recicláveis, metais de algum valor e papéis/papelão que são colocados por catadores em containeres recolhidos com uma determinada frequência por uma empresa recicladora. Os resíduos hospitalares foram dispostos no mesmo local até 1993 junto com os resíduos comuns. Nesta época começou a operar um incinerador de dupla câmara, capacidade de 500 kg/h, da marca Umwelt que realizou a incineração dos resíduos hospitalares até 1997, quando então esta operação passou a ser realizada num forno adaptado na chaminé do antigo forno da metalúrgica Lanari, desativada.

Há uns quatro anos começou a operação de recobrimento diário do lixo depositado com o espalhamento de argilas da região. É obtida uma camada de aproximadamente dez centímetros de argila de cobertura. Antes do recobrimento um grupo de catadores retira do monte depositado os materiais de algum valor de venda. A operação do aterro é realizada por um trator de esteiras com lâmina, uma retro-escavadeira, uma pá mecânica e um caminhão basculante de 6 m<sup>3</sup>. Estas operações são realizadas por três operadores de máquinas, dois motoristas, seis ajudantes, um administrador e dois vigias que também são responsáveis pela manutenção do local.

#### **4.1.1.2 NATUREZA DOS RESÍDUOS EXISTENTES NO ATERRO**

São resíduos sólidos urbanos, tanto de coleta domiciliar quanto de varrição. No entanto durante muitos anos, conforme acima citado, e até uns cinco anos atrás, o lixo hospitalar do município também era lá depositado.

#### **4.1.1.3 UTILIZAÇÃO DE TÉCNICAS DE ENGENHARIA**

Não são utilizadas técnicas de engenharia para operação do aterro. Somente é realizada uma cobertura diária dos resíduos depositados com solos argilosos da região e com auxílio de tratores. Nenhum outro procedimento de engenharia é desenvolvido, assim como não são instalados drenos de gás ou de chorume, ou realizada drenagem superficial. Também não são realizadas separações em células, impermeabilização ou mesmo preparação da base do aterro. Somente é orientado pelo administrador do aterro em qual frente os resíduos deverão ser dispostos. Atualmente os trabalhos de disposição se desenvolvem na frente norte, que progride em direção ao centro de Paracambi, já que as outras estão limitadas por residências e pela linha férrea.

#### **4.1.1.4 CONTROLE DE ACESSO DA POPULAÇÃO EM GERAL**

Não existe controle efetivo de acesso da população na área do aterro apesar de existir uma cerca junto à estrada que contorna o lixão, mas não existe portão. O acesso é permanente através da estrada. Na parte leste do lixão, atualmente limitado pela linha férrea, o acesso é total para qualquer pessoa inclusive crianças. As residências mais próximas estão alinhadas com a linha férrea e o rio dos Macacos. Existe um campo para a prática de futebol, com balizas e demarcações e com dimensões de futebol *society*. Está em utilização e observa-se que a linha demarcatória da lateral coincide com a base do talude do lixão. Neste local crianças são vistas brincando, assim como ao lado grupos de catadores desempenham suas funções.

#### **4.1.1.5 SUBSTÂNCIAS CONTAMINANTES DE INTERESSE EMITIDAS NO LOCAL**

Existem contaminantes de interesse sendo emanados do sítio. O aterro, que está com uma altura de aproximadamente 9 metros na sua parte mais profunda, já que está num declive, e que possui algo em torno de 250.000 toneladas de resíduos com alguma compactação, está na fase metanogênica. Dessa forma está gerando biogás, com a composição característica da fase metanogênica estável, aproximadamente 50% de metano e também de dióxido de carbono, assim como percentuais, menores, de gás sulfídrico e mercaptanos. Estes gases migram pela camada de cobertura (muito delgada) e, também, pelas laterais do aterro, através do talude de 9 metros e inclinação de 60° que não possui nenhum tipo de cobertura. Além dos efluentes gasosos é relevante a geração de poeiras decorrentes da operação do aterro e movimentação dos solos de cobertura, os quais geram materiais particulados carregados para as residências próximas, que estão a menos de 30 metros em alguns pontos. Os odores gerados na área do aterro e a presença de vetores tais como muitos urubus no local, caracterizam um impacto imediato para as pessoas circunvizinhas à área. Evidentemente a contaminação por percolação na massa de resíduos, o processo de lixiviação, a contaminação do lençol freático e o deslocamento da pluma de contaminação para o rio dos Macacos e poços de captação da região, se constituem em grandes problemas a resolver neste cenário.

#### **4.1.1.6 OUTRAS FONTES DE EXPOSIÇÃO PRÓXIMAS AO LOCAL**

Existe uma outra fonte de exposição que se destaca próximo ao sítio estudado, que é o cemitério municipal. Está localizado a 50 metros e numa cota superior de 25 metros em relação ao aterro, e está situado a montante do aterro em relação ao rio dos Macacos.

## **4.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS RECEPTORES:**

### **4.1.2.1 TAMANHO E A COMPOSIÇÃO DA POPULAÇÃO SOB RISCO**

O aterro está localizado entre os bairros Centro, Lages e Amapá. Considerando-se um raio de impacto de 2 quilômetros isto abrangeria ai aproximadamente 80% do bairro de Lages, um dos maiores, resultando que mais da metade da população urbana do município, de 42.000 habitantes, estaria dentro deste raio. Portanto, para um raio de dois quilômetros teríamos aproximadamente 22.000 pessoas atingidas. Para um raio de um quilômetro estima-se um total de 6.000 pessoas residentes. No entanto, como o sítio está localizado muito próximo da área central e as residências margeiam o rio dos Macacos e a rodovia estadual RJ-127, asfaltada e em posição paralela ao rio, deverá ser considerada também a população em trânsito por esta rodovia. .

### **4.1.2.2 CARACTERÍSTICAS DA POPULAÇÃO SOB RISCO**

A população mais representativa sob risco é da classe D e E localizada às margens do rio dos Macacos e nos limites do aterro. Mas considere-se que existem residências caracterizando uma ocupação da área pela classe C. No entanto, e principalmente para o estudo de caso, existem várias escolas públicas próximas à área do aterro dentre as quais destacam-se pela proximidade: CIEP 152 Garrincha Alegria do Povo, E.M. Santo Antônio Pré Escolar, Creche Municipal Vila São José, E.M. Prof. Odete Teixeira da Silva, CIEP 385 Pastor Augustinho Valério de Souza, CIEP 499 Prof. Nicola Salzano. Também situa-se próximo do aterro a Casa de Saúde Dr. Eiras.

Além dessas o município possui mais 22 escolas totalizando 28 entre públicas e privadas. Somente 9 estão localizadas em zona considerada como rural.

Segundo IBGE (2004a), as matrículas no ensino fundamental, ano 2003, foram de 7.596 crianças, mais 3.215 no ensino médio.

### **4.1.3 CARACTERIZAÇÃO DOS CAMINHOS DE EXPOSIÇÃO:**

Os caminhos de exposição a considerar são:

O caminho aéreo através do ar ambiente, conduzindo os gases (biogás) produzidos pelo aterro, os fumos de queimadas eventuais na superfície do lixão, e as poeiras geradas pela movimentação ou não de veículos na superfície do solo de cobertura.

Considere-se ai também os casos de combustão espontânea em vista da emissão de metano em condições de inflamabilidade (taxa entre 4 e 20% em volume).

Também muito importante a condução de microorganismos pelas poeiras produzidas pela operação do lixão (MP10 e MP2,5) e que certamente estão provocando contaminação por inalação na população sob risco.

Além do ar, no caso de Paracambi, pelo fato da localização do rio dos Macacos, formador do rio Guandu, que por sua vez abastece a região metropolitana do Rio de Janeiro, o cenário é muito preocupante. Portanto o caminho de exposição através do meio líquido é muito relevante neste cenário. Tanto o chorume produzido pelo lixão, que certamente está contaminando o lençol freático e conduzido pela pluma de contaminação até o rio dos Macacos, quanto as águas de superfície, resultantes da precipitação na região cuja condução natural é o próprio rio. Pelo que se pode observar as residências próximas possuem água canalizada. No entanto é ainda prática a utilização de poços para utilização de água para outros fins que não os de uso doméstico. Mas, mesmo nesse caso a contaminação se dará em vista da plantação de vegetais para consumo próprio, para uso de animais. Um outro caso crítico é a existência da área de lazer sem nenhum controle ao pé do lixão, constituída pelo campo de prática de futebol. Quando chove o terreno fica inundado por água diretamente contaminada com chorume. O caminho de exposição pelo meio sólido se dá pelas poeiras do solo de cobertura, pela ingestão de solo pelas crianças, principalmente.

## **4.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO**

Mesmo sem ter sido feita análise dos contaminantes a não ser do biogás, pode-se afirmar que o caminho completo de exposição existe e estudos epidemiológicos deverão ser realizados.

No caso de Paracambi só existem respostas positivas. É muito evidente o caminho completo de exposição.

### **4.2.1 CARACTERIZAÇÃO DO MUNICÍPIO ESTUDADO**

Paracambi é um município situado na região metropolitana do Rio de Janeiro, noroeste do estado. Tem uma área de 179,8 km<sup>2</sup> e uma população de 40.475 habitantes. (IBGE, 2004a). Teve a sua emancipação promulgada pela Lei Estadual no. 4.426 de 08/08/60 e instalado em 13/11/60, tendo se desmembrado dos municípios de Itaguaí e Vassouras. O município apresentava em 1996 uma taxa de urbanização de 93,4%, considerando que o seu território está dividido em 2% de área urbana e 98% de área rural.

As coordenadas geográficas do município são 22°36'39" Sul 43°42'33" Oeste e 50 metros de altitude na sede municipal. Limita-se com os municípios de Seropédica, Itaguaí, Piraí, Mendes, Paulo de Frontin, Miguel Pereira e Japeri.

O município possui dois distritos, Paracambi e Lages, e 17 bairros: Quilombo, BNH, Capinheira, Raia, Fábrica, Centro, Amapá, Lages, Guarajuba, Nova Era, Cascata e Sabugo, na área urbana do município, e Ponte Coberta, São José, Floresta, Saudoso e Cabral, na área rural.

As atividades primárias têm grande importância no município cuja produção de bananas se destaca na Região Metropolitana. No setor secundário destacam-se as fábricas de tecido e olarias, ao lado de outras pequenas indústrias. O setor terciário é pouco desenvolvido no município.

Com relação ao sistema viário, deve-se ressaltar a precariedade das estradas vicinais, contrastando com malha rodoviária estadual, mais desenvolvida, que facilita a comunicação com o Rio de Janeiro, Niterói e demais Municípios da região.

O Município também é servido por ramal da antiga Estrada de Ferro Central do Brasil, hoje RFFSA, em condições precárias de conservação.

As condições de saneamento do município de Paracambi são precárias, acompanhando o perfil da maior parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro. Isto vem se refletir no agravamento da poluição da Baía de Sepetiba, para a qual seus rios são contribuintes.

As redes gerais de água e esgotos são de pequena extensão. Ressalta-se, contudo que não há na Lei Orgânica artigo que defina a obrigatoriedade de instalação de fossa e sumidouros em todas as edificações.

As principais características físicas do município no que diz respeito a clima, geologia, geomorfologia, hidrografia e vegetação encontram-se descritas a seguir.

#### **4.2.1.1 ASPECTOS AMBIENTAIS**

##### **4.2.1.1.1 CLIMA**

Na bacia da Baía de Sepetiba, área intertropical, entre a montanha e a planície, existe uma grande diversidade de regime de chuvas e temperaturas.

As temperaturas nas baixadas são mais elevadas, ultrapassando 40°C no verão, enquanto que nas partes altas, podem chegar a -6°C no inverno. Da mesma forma, a precipitação pluviométrica também é bastante variável, quando comparadas às baixadas (média anual em torno de 1000 a 1500 mm) e as áreas altas, onde podem ultrapassar a 2000 mm.

A associação relevo-altitude é responsável pelo aumento da turbulência do ar, ao mesmo tempo em que a ascendência orográfica atua no sentido de resfriá-lo e, conseqüentemente, provocar a saturação do vapor d'água causando, assim, os freqüentes nevoeiros, neblinas e chuvas orográficas nos contrafortes da Serra do Mar.

Quanto às massas de ar atuantes, pode-se afirmar que o Estado do Rio de Janeiro está submetido, ao longo do ano, aos ventos de Leste e Nordeste, que sopram do Anticiclone Semi-fixo do Atlântico Sul. Esse centro de Alta Pressão Subtropical é responsável pela manutenção das temperaturas médias em patamares, mais ou menos elevados, altos níveis de umidade relativa, e tempo bom - geralmente associado ao céu limpo, azul e livre de nebulosidade.

Várias correntes, sobretudo aquelas provenientes do Sul, perturbam a circulação atmosférica normal e, conseqüentemente, o tempo descrito acima. As correntes perturbadas de Sul são responsáveis pelos fortes temporais de verão. Também podem estacionar sobre a região provocando longos períodos de chuvas. Outros tipos de correntes perturbadas são as provenientes do Oeste, também denominadas frentes tropicais. Acarretam, geralmente, chuvas e trovoadas, por vezes granizo e ventos moderados a fortes, que podem atingir 60 a 90 km/h.

O Município de Paracambi está localizado em regiões classificadas como de Clima Tropical Quente (temperatura média superior a 18°C) e sub-quente (entre 18 e 15°C) e sub-tipo úmido (1 a 3 meses seco). No que se refere à temperatura do ar, a média das máximas obtida, no período mencionado, foi de 29,2°C e a média das mínimas de 19,2 °C. Destaca-se a máxima absoluta de 41,0 °C em fevereiro de 1973 e a mínima absoluta de 6,5°C em junho de 1979. As temperaturas médias mensais mais elevadas ocorreram nos meses de verão — janeiro, fevereiro e março, e as mais reduzidas nos meses de inverno — junho, julho e agosto.

Quanto à precipitação pluviométrica observa-se uma altura total anual de 1.224,9 mm, com os maiores valores ocorrendo no período de novembro a abril (meses mais quentes) - médias mensais variando entre 109,2 mm (abril) e 196,1 mm (janeiro). Nos demais meses o índice médio obtido variou entre 30,7 mm (julho) e 93,6 mm (outubro).

A evaporação anual total obtida foi de 1352,3 mm, superando a altura pluviométrica total. O maior valor médio foi obtido no mês de janeiro (123,0 mm) e o menor em abril (91,1 mm).

#### **4.2.1.1.2 GEOLOGIA**

No Município de Paracambi podem ser encontradas rochas de idades Pré-Cambrianas e Quaternárias. O Pré-Cambriano é representado pelo compartimento tectônico denominado *Faixa Serra dos Órgãos* que ocorre na parte central do Estado, com topografia bem acidentada, abrangendo toda a escarpa da Serra do Mar, desde Parati (próximo à Ilha Grande) até as proximidades de São Fidélis, com cotas variando desde 2000m até o nível do mar. Compõe-se de migmatitos, gnaisses bandados, gnaisses predominantemente tonalíticos, gnaisses granitóides, granitos, metatexitos e kinizigitos.

O Quaternário, constituído por cascalhos, areias e amua inconsolidados, pode ser dividido em dois ambientes deposicionais: Sedimentos Fluviais e Sedimentos Litorâneos. Destacam-se os sedimentos fluviais, que correspondem a depósitos de planície de inundação, canais fluviais, leques aluviais e tálus.

#### **4.2.1.1.3 GEOMORFOLOGIA**

São dois os Domínios Morfoestruturais do Estado do Rio de Janeiro: Depósitos Sedimentares e Faixas de Dobramentos Remobilizados. Os primeiros, localizam-se, predominantemente, nas áreas litorâneas, estendendo-se desde o oceano até as escarpas do planalto, representadas pela Serra do Mar. Compreendem duas Regiões Geomorfológicas — os Tabuleiros Costeiros e as Planícies Costeiras. As Faixas de Dobramentos Remobilizados ocupam, preponderantemente o interior do território fluminense.

O Município de Paracambi está situado sobre as regiões de Colinas e Maciços Costeiros e de Escarpas e Reversos da Serra do Mar.

As Colinas e Maciços Cesteiros intercalam-se com as Planícies Costeiras, podendo atingir a costa, formando pontões e falésias. As regiões de Escarpas e Reversos da Serra do Mar (Serra dos Órgãos e Planalto Bocaina), refletem a influência dominante dos agentes internos, causadores dos dobramentos e falhamentos arqueozóicos e proterozóicos, dos sucessivos ciclos erosivos, da reativação de falhas e da remobilização de blocos ocorridos no Terciário.

#### **4.2.1.1.4 HIDROLOGIA**

O Município de Paracambi está situado, predominantemente, na Macrorregião Ambiental 2 (MRA-2), oficializada pelo Decreto 26.058 de 14/03/2000, que compreende as bacias contribuintes à Baía de Sepetiba.

Compreende os rios que deságuam na Baía de Sepetiba, desde a Barra de Guaratiba até o limite de Mangaratiba com Angra dos Reis.

Tais rios nascem na Serra do Mar e são responsáveis pela formação de uma extensa planície que, por ser embrejada, exigiu obras de retificação de muitos deles e construção de canais de drenagem, como o São Francisco, o Itá e o Pedro II, no Município do Rio de Janeiro.

Dentro os rios desta região, merecem destaque os da bacia do Guandu, cujas águas, interligadas com as do Ribeirão das Lajes e do Paraíba do Sul, são captadas pela adutora do Guandu, a fim de serem tratadas para o consumo pela população da maior parte da Região Metropolitana do Rio de Janeiro.

A cidade de Paracambi é cortada pelo rio dos Macacos, contribuinte do Ribeirão das Lajes, mas seu principal corpo d'água é o rio Ribeirão das Lajes. O aterro de resíduos sólidos municipais, o lixão focado nessa dissertação, está situado exatamente às margens do rio dos Macacos.

A Baía de Sepetiba, juntamente com sua bacia hidrográfica, constitui-se em um ecossistema de extrema importância no contexto da cidade do Rio de Janeiro. Ao longo do tempo, contudo, esse ecossistema vem sofrendo um processo constante de poluição das águas decorrente da concentração populacional, do crescimento urbano desordenado, bem como, de processos industriais.

De uma forma geral, todos os rios da região se acham bastante degradados. Um dos grandes problemas existentes na Baía de Sepetiba e sua bacia hidrográfica é o lançamento de esgotos domésticos e a presença de lixo, consequência da ausência de uma infra-estrutura adequada de saneamento básico.

#### **4.2.1.1.5 VEGETAÇÃO**

Destaca-se no Município de Paracambi poucos remanescentes de Floresta Ombrófila Densa (Mata Atlântica) nas porções mais elevadas. Parte, encontra-se protegida na Reserva Biológica do Tinguá – IBAMA, com cerca de 26.000 ha, que abrange além do município de Paracambi, os municípios de Duque de Caxias, Miguel Pereira, Petrópolis e Vassouras.

A outra ocorrência de Mata Atlântica preservada está na região da antiga Fábrica Brasil Industrial, com 14 ha de mata preservada, sem no entanto ter qualquer tipo de caracterização quanto ao processo de uso. O Plano Diretor do município classifica a área como sendo de interesse ambiental, sem contudo, definir os seus limites.

#### 4.2.1.2 ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS

##### 4.2.1.2.1 DINÂMICA POPULACIONAL

No município, 36.868 constituem a população urbana e 3.607 vivem na região rural (IBGE, 2004a), cuja evolução da densidade demográfica pode ser observada na tabela abaixo.

ANO	1940	1950	1960	1970	1980	1991	1996	2000
Densidade demográfica	48,4	61,0	68,8	141,1	168,6	202,4	219,4	216,3

Tabela 2 – Evolução da densidade demográfica no município de Paracambi (hab/km<sup>2</sup>). Fontes: IBGE, 2004a, e CIDE, 2004.

Segundo dados do CIDE (2004), a população do município tem evoluído em taxa média geométrica de crescimento anual da ordem de 1,54%, observando-se uma redução gradativa ano a ano.

Ano	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
População	35.872	36.427	37.019	37.616	38.219	38.827	39.441	40.060	40.686	41.317	41.953
Crescimento		1,55%	1,63%	1,61%	1,60%	1,59%	1,58%	1,57%	1,56%	1,55%	1,54%

##### 4.2.1.2.2 ESTABELECEMENTOS INDUSTRIAIS, COMERCIAIS E SERVIÇOS

O número de estabelecimentos industriais, comerciais e de serviços, por classe, existentes no Município, conforme levantamento feito em 2001, totaliza 652 unidades locais com CNPJ atuantes, apresentando as seguintes indicações:

Estabelecimento agrícola – 253

Culturas predominantes: banana, aipim e quiabo

Indústria de Transformação – 31

Extrativa Mineral – 3

Serviços Industriais de Utilidade Pública – 1

Comercial – 158

Serviços – 96

Construção Civil – 6

Indicadores do potencial turístico (hotéis, pousadas e etc)

Hotéis – 1 com 30 leitos

Pousadas – 2 com 26 leitos

Restaurantes, lanchonetes – 23

Sítios de lazer – 3

#### **4.2.1.2.3 POTENCIALIDADES ECONÔMICAS**

Conforme levantamentos recentes, realizados pela FIRJAN, podem ser definidas as seguintes potencialidades econômicas para o Município:

Produção de bananas

Fabricação de tecidos e arame

Comércio e prestação de serviços

Além dessas potencialidades, as características físicas de Paracambi apontam para vocações voltadas para o Ecoturismo, o Agroturismo e a Agroindústria, sendo que a exploração econômica desses segmentos possibilitaria a manutenção de um ambiente apropriado, associando desenvolvimento sustentado com qualidade de vida.

#### 4.2.1.3 ASPECTOS SOCIAIS

No município de Paracambi existem cadastradas catorze famílias, totalizando quarenta e um indivíduos relacionados ao aterro de resíduos sólidos. Trinta e oito são os que atuam no lixão. A idade do grupo varia de menores de 1(um) ano a 87 (oitenta e sete) anos. Registrou-se que as crianças de 7 (sete) anos em diante já atuam como selecionadores/catadores de material.

A escolaridade conhecida da maior parte do grupo (31 indivíduos) é baixa e se concentra no primeiro segmento do primeiro grau (76%). Mas muitos ainda são estudantes, apesar de estarem fora da faixa etária, o que é um aspecto positivo no sentido de que, ou retornaram à escola ou não a deixaram. No segundo segmento do primeiro grau encontramos oito indivíduos(19,5%).

O aterro de resíduos sólidos do município existe há pouco mais de trinta anos e a atuação dessas famílias vai desde um ano ao tempo de existência do aterro. Das catorze famílias sete atuam no lixão até três anos, quatro atuam de oito a onze anos, duas ultrapassam os vinte anos e somente uma não soube precisar o tempo de seu trabalho como catadora.

O cadastramento dessas famílias foi feito pela Secretaria de Promoção social de Paracambi visando o enquadramento de seus indivíduos nos programas sociais já em andamento no município. Poucos catadores estavam inseridos nos programas, seja pelo desconhecimento da realidade do grupo pelo poder público local, ou pelos catadores ignorarem os benefícios administrados pela Prefeitura.

Merecem destaque dois programas do governo federal nos quais há registros de envolvimento de catadores do lixão. O PETI (Programa de Erradicação do Trabalho Infantil) que atende crianças de sete a catorze anos. Neste é concedida uma bolsa financeira que permita que a criança permaneça na escola num período e no outro tenha atividades complementares; reforço escolar, esporte e lazer. O outro programa é o "Agente Jovem", do mesmo tipo do primeiro, e que se estende aos jovens de quinze a dezessete anos. Contempla as famílias com bolsa um pouco maior que a do PETI, prevendo atividades extra curriculares orientadas além das de núcleo comum.

A renda mensal auferida pelos catadores individualmente no lixão, é baixa, e somente dezessete declararam valores. Estes valores se apresentaram extremamente variáveis indo desde R\$40,00 até R\$350,00, com uma distribuição bastante uniforme até o valor de R\$180,00, apresentando em seguida dois saltos: R\$270,00 e R\$350,00.

## 4.2.2 CARACTERIZAÇÃO DO SÍTIO E DOS CONTAMINANTES

### 4.2.2.1 EXISTÊNCIA DE ATIVIDADES HUMANAS NA ÁREA DO SÍTIO;

Serão apresentadas as atividades humanas na área do sítio em questão, com a melhor identificação possível dentro de um raio de um e de dois quilômetros do sítio, plotadas em mapa:

#### 4.2.2.1.1 Levantamento de informações da existência de catadores

Dados referentes aos catadores do lixão (2002):

- Número de famílias: 14
- Solteiros: não há registro.
- Crianças: 5
- Adolescentes: 9
- Total de pessoas: 41
- **Escolaridade**
  - Homens: 18
    - completaram o ensino fundamental
      - 11 possuem ensino fundamental incompleto (entre 1 e 4 série)
      - não possuem referência de escolaridade
      - 1 menino abaixo da idade escolar.
  - Mulheres: 23
    - 1 com ensino fundamental e ensino médio completos
    - 16 possuem ensino fundamental incompleto (1 a 6 série)
    - não possuem referência de escolaridade.
- **Renda mensal** (por indivíduo)
  - Adultos: Somente 17 pessoas declararam possuir uma renda mensal: 1 pessoa com renda de 40,00 (valor mais baixo ) e 1 com renda de 350,00 reais (valor mais alto ).
- **Organização social** : não existem registros de organizações sociais. A participação destas se faz de modo informal.

**Associações :**

Não existem registros de cadastramento dos comerciantes vinculados aos catadores e cadastramento das ONG's e/ou grupos de apoio aos catadores.

#### **4.2.2.2 COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS**

Os ensaios realizados por Silveira (2004) tiveram como objetivo a definição do percentual de matérias orgânicas e inorgânicas presentes no lixo do município de Paracambi. Os resultados são importantes para o cálculo da geração de gases no aterro atual e o entendimento dos fenômenos geotécnicos inerentes aos maciços de lixo daquele sítio. Além disso se constitui num elemento essencial para a implantação de projetos de gestão de resíduos sólidos na região e para o dimensionamento dos componentes de projetos, quer seja da coleta, do transporte , e da disposição em aterro ou do tratamento a adotar.

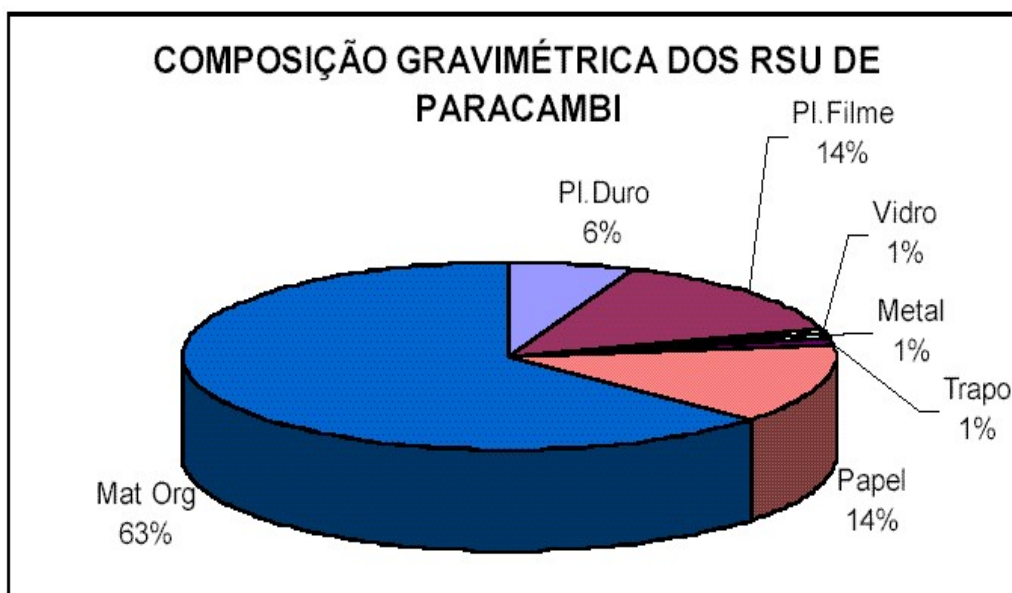
Na avaliação da composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos, foi adotado o seguinte procedimento:

- 1- Descarregamento do caminhão em um galpão da Prefeitura
- 2- Homogeneização, com o rompimento dos sacos e revolvimento dos resíduos
- 3- Quarteamento da massa de lixo: divisão da massa em quatro partes, separação de duas partes para constituir a massa de ensaio
- 4- Separação da massa de lixo, que foi colocada em onze latões
- 5- Pesagem dos latões
- 6- Triagem : o conteúdo de cada latão foi despejado sobre uma manta de plástico, para que fosse feita a separação dos componentes : papel, plástico duro, plástico filme, vidro, metal ferroso, trapo, e matéria orgânica

Feita a pesagem dos componentes resultou na composição da massa de lixo ensaiada conforme a seguir apresentado:

**Tabela 3 - Composição gravimétrica do lixo de Paracambi**

Tambor	Plástico		Vidro	Metal	Trapo	Papel	Mat Org	Total
	Duro	filme						
1	4.00	7.20	-----	-----	2.00	6.00	29.00	48.20
2	1.00	9.00	0.30	0.30	0.10	8.30	17.00	36.00
3	6.50	7.10	0.40	0.10	-----	7.50	24.00	45.60
4	1.00	7.00	0.70	0.20	-----	4.50	24.20	37.60
5	2.30	4.20	-----	2.30	0.30	4.20	36.20	49.50
6	1.00	1.60	0.20	0.10	-----	6.20	35.00	44.10
7	1.00	6.00	-----	-----	-----	6.20	29.50	42.70
8	2.50	5.90	2.70	0.20	1.40	8.30	31.00	52.00
9	2.40	6.60	-----	0.10	-----	6.30	25.40	40.80
10	5.20	6.60	-----	0.10	0.70	5.20	17.60	35.40
11	2.50	6.00	0.20	0.20	0.10	2.50	32.50	44.00
Total	29.40	67.20	4.50	3.60	4.60	65.20	301.40	475.90



**Figura 4 - Composição gravimétrica - RSU de Paracambi (Silveira, 2004)**

Observações:

- o item papel, inclui papelão.
- o item metal refere-se aos ferrosos, pois não encontramos os não ferrosos (alumínio).
- a matéria orgânica inclui pequena quantidade de papel impregnado de matéria orgânica.

#### **4.2.2.3 CONTROLES TÉCNICOS DE ENGENHARIA - AVALIAÇÃO DA QUALIDADE DO ATERRO**

Conforme proposta de Faria (2002) foi realizada a avaliação do índice de qualidade do aterro (IQA) de Paracambi apresentado na figura a seguir. O resultado foi de 2,57 numa escala de 10, o que o coloca classificado como um aterro de condições inadequadas, como é flagrante de ser observado no local.

ÍNDICE DA QUALIDADE DE ATERROS DE RESÍDUOS - IQA									
Município: PARACAMBI / RJ					Licença (sim/não): NÃO				
Data: 11 / 11 / 2004					Técnico: NÃO HÁ				
Item	Sub-item	Avaliação	Peso	Pontos	Item	Sub-item	Avaliação	Peso	Pontos
C A R A C T E R Í S T I C A S  D O  L O C A L	capacidade de	adequada	5	5	C O N D I Ç Õ E S  O P E R A C I O N A I S	presença de elem.	não	1	0
	suporte do solo	inadequada	0			dispersos vento	sim	0	
	permeabilidade	baixa	5	2		recobrimento	sim	4	4
	do solo	média	2			diário do lixo	não	0	
	proximidade de	longe > 500m	5	0		compactação	adequada	4	2
	núcleos hab.	próximo	0			do	inadequada	2	
	proximidade de	longe > 200m	3	0		lixo	inexistente	0	0
	corpos de água	próximo	0			presença de	não	1	
	profundidade	maior 3m	4	2		urubus-gaivotas	sim	0	0
	do lençol	de 1 a 3m	2			pres. de mocas	não	2	
	freático	de 0 a 1m	0	2		em grande quant.	sim	0	1
	disponibilidade	suficiente	4			presença de	não	1	
	de material para	insuficiente	2	2		queimadas	sim	0	0
	recobrimento	nenhum	0			presença de	não	3	
qualidade do mat.	boa	2	2	catadores	sim	0	0		
p/ recobrimento	ruim	0		criação de	não	3			
condições de	boas	3	3	animais (bois etc)	sim/proximid.	0	0		
sistema viário-	regulares	2		descarga de res.	não	3			
trânsito-acesso	ruins	0	0	de serv. de saúde	sim	0	3		
isolam. visual	bom	4		descarga de res.	não/adequada	4			
da vizinhança	ruim	0	0	industriais	sim/inadequada	0	4		
legalidade de	loc. permit.	5		funcion. da	bom	3			
localização	loc. proibida	0	0	drenagem de	regular	2	0		
<b>sub-total 1</b>	<b>máximo</b>	<b>40</b>		<b>16</b>	chorume	inexistente		0	
I N F R A E S T R U T U R A I M P L A N T A D A	cercamento	sim	2	I N F R A E S T R U T U R A I M P L A N T A D A	funcion. da	bom	2	0	
	da área	não	0		drenagem pluv.	regular	1		
	portaria/	sim	1		definitiva	inexistente	0	0	
	guarita	não	0		funcion. da	bom	2		
	controle de	sim c/ balança	2		drenagem pluv.	regular	1	0	
	recebimento	sim s/ balança	1		provisória	inexistente	0		
	de cargas	não	0		funcion. da	bom	2	0	
	acesso à frente	bom	2		drenagem de	regular	1		
	de trabalho	ruim	0		gases	inexistente	0	0	
	trator de	permanente	5		funcion. do	bom	5		
	esteiras ou	periodicam	2		sist. de tratam.	regular	2	0	
	compatível	inexistente	0		chorume	inexistente	0		
	outros	sim	1		funcion. do	bom	2	0	
	equipamentos	não	0		sist. de monitor.	regular	1		
	impermeabil. da	sim/desneces.	5		das águas subt.	inexistente	0	0	
	base do aterro	não	0		funcion. do sist.	bom	2		
	drenagem	suficiente	5		de monitor. das	regular	1	0	
	de	insuficiente	1		ág. sup., lix. e gas.	inexistente	0		
	chorume	inexistente	0		funcion. do	bom	2	0	
	drenagem de	suficiente	4		monitor. da estab.	regular	1		
	águas pluviais	insuficiente	2		dos maciços	inexistente	0	0	
	definitiva	inexistente	0		medidas	sim/desnec.	2		
	drenagem de	suficiente	2		corretivas	não	0	0	
	águas pluviais	insuficiente	1		dados gerais	sim	1		
	provisória	inexistente	0		sobre o aterro	não/incompleto	0	1	
	drenagem	suficiente	3		manutenção	boas	2		
	de	insuficiente	1		dos acessos	regulares	1	0	
	gases	inexistente	0		internos	péssimas	0		
	sist. de tratam.	suficiente	5		plano de fechamento	sim	1	0	
	de chorume	insuf. /inexist.	0		do aterro	não	0		
	monitoramento	suficiente	3		<b>sub-total 3</b>	<b>máximo</b>	<b>52</b>	<b>15</b>	
	de águas	insuficiente	1		<b>Total (1+2+3)</b>		<b>140</b>	<b>36</b>	
	subterrâneas	inexistente	0		<b>IQA = Soma dos pontos / 14</b>			<b>2,57</b>	
	monitoramento das	suficiente	3						
águas superf.,	insuficiente	1							
lixiviados e gases	inexistente	0							
monitoramento da	suficiente	3							
estabil. maciços	insuficiente	1							
de solo e de lixo	inexistente	0							
atendimento a	sim	2							
estipulações	parcialm	1							
de projeto	não	0							
<b>sub-total 2</b>	<b>máximo</b>	<b>48</b>	<b>5</b>						
					<b>IQA</b>	<b>Avaliação</b>			
					0 a 6,0	Condições inadequadas			
					6,01 a 8,0	Condições controladas			
					8,01 a 10	Condições adequadas			

Figura 5 - Avaliação da Qualidade do aterro de Paracambi - IQA

## **4.3 INVESTIGAÇÃO DA ATUAÇÃO DA CAMADA DO SOLO DE COBERTURA**

### **4.3.1 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **4.3.1.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO NA ÁREA DO ATERRO**

A caracterização geotécnica da área de estudo foi feita com base em sondagens SPT, ensaios para a determinação da permeabilidade em laboratório e campo, utilizando-se permeâmetro Guelph, ensaios de caracterização física e testes de coluna em laboratório, conforme Schueler (2005).

##### **4.3.1.1.1 Solo de cobertura**

A camada de solo de cobertura do aterro de Paracambi é executada de forma bastante irregular. São utilizadas sobras de solo provenientes de escorregamentos que ocorrem na cidade. A amostra de solo foi coletada a uma profundidade de 30 cm, e a seguir é apresentada sua curva granulométrica e os limites de Atterberg.

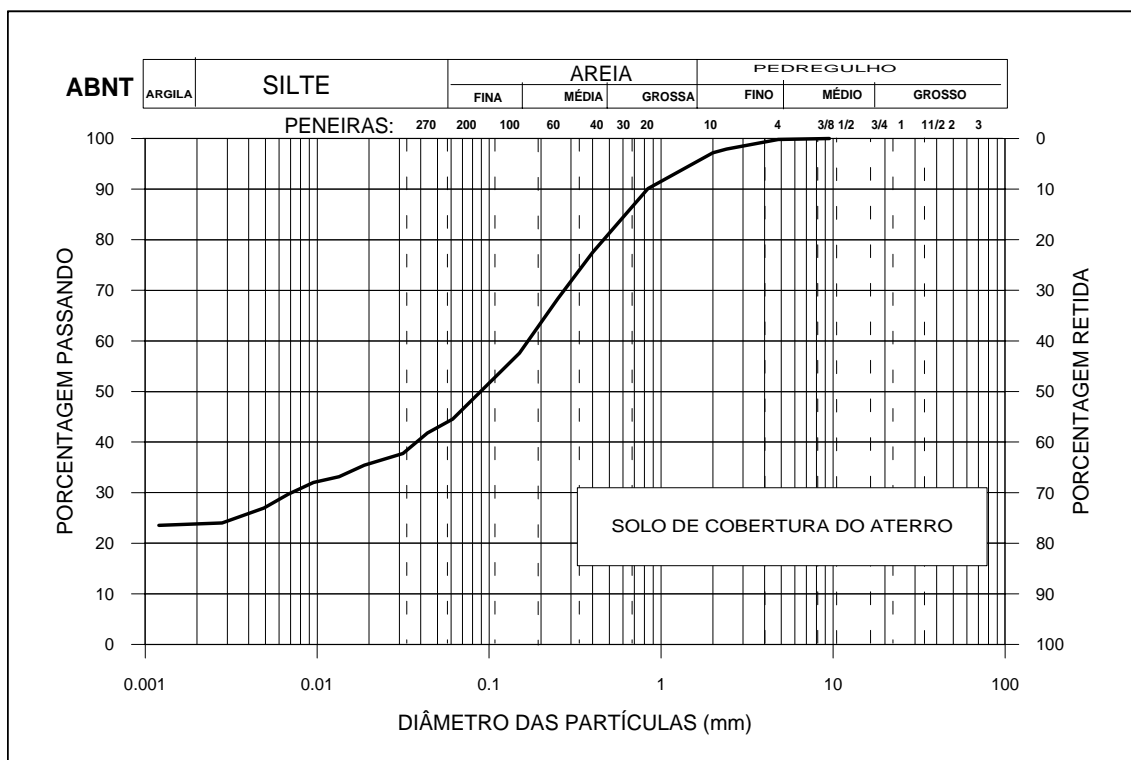
Trata-se de uma areia silte argilosa que, pelo gráfico de plasticidade seria classificada com um silte inorgânico de mediana compressibilidade e siltes orgânicos. Isto é possível para o local tendo em vista uma certa mistura desta camada com o lixo. A espessura observada desta camada ficou em torno de 50 a 70 cm, valendo frisar a presença de lixo misturado por vezes com o solo. Destaque-se que a cravação dos drenos foi uma operação difícil tendo em vista esta mistura na camada de cobertura, sendo que a presença de lixo cresce com a profundidade.

Pelo Sistema Unificado de classificação de solos – USCS – a sua classificação é SC, considerando-se que aproximadamente 23% do solo é composto de argila, 22% corresponde à fração silte e 53% do total corresponde à fração areia, tendo ainda 2% de pedregulho fino.

#### **Limites de Atterberg**

Resultados dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg do solo da cobertura:

- Limite de Plasticidade    LP = 34,8 %
- Limite de Liquidez        LL = 65,8 %
- Índice de Plasticidade    IP = 31,0 %



**Figura 6 - Curva granulométrica do solo de cobertura do aterro**

#### 4.3.1.1.2 Solos da base do aterro

Este solo foi coletado próximo ao aterro e dada à sua localização pode-se supor que seja solo original e semelhante ao que serviu de base para a construção do lixão. A coleta foi feita através de sondagens SPT conforme apresentado por Schueler (2005), sendo executadas seis sondagens na área de estudo, até a profundidade de 5,5 metros. As sondagens mostraram que existem três camadas principais de solo. A primeira é composta de um silte inorgânico arenoso de mediana compressibilidade, e que contem fragmentos de lixo. Sua espessura apresenta-se entre 1,5 e 2,5 metros. As duas camadas seguintes, conforme esperado, estão mais decompostas apresentando-se como argilas inorgânicas de baixa plasticidade. A segunda camada é composta ora de areia argilosa ou silto argilosa, ora de argila siltosa com areia, com uma espessura que varia entre 2,5 e 5,0 metros. Abaixo, aparece uma camada de areia com diversas proporções de silte e argila. O nível freático, nesses pontos, variou de 2,0 a 4,0 metros de profundidade ao longo do ano em que foi desenvolvido o trabalho de campo.

#### Limites de Atterberg

Resultados dos ensaios para determinação dos limites de Atterberg do solo abaixo do aterro:

Primeira camada:

- Limite de Plasticidade LP = 34,2 %
- Limite de Liquidez LL = 59,4 %
- Índice de Plasticidade IP = 25,2 %
- Espessura  $h_1 = 1,5$  a 2 m

Segunda camada:

- Limite de Plasticidade LP = 20,4 %
- Limite de Liquidez LL = 37,8 %
- Índice de Plasticidade IP = 17,4 %
- Espessura  $h_2 = 2,5$  a 5 m

Terceira camada:

- Limite de Plasticidade LP = 23,5 %
- Limite de Liquidez LL = 42,2 %
- Índice de Plasticidade IP = 18,7 %

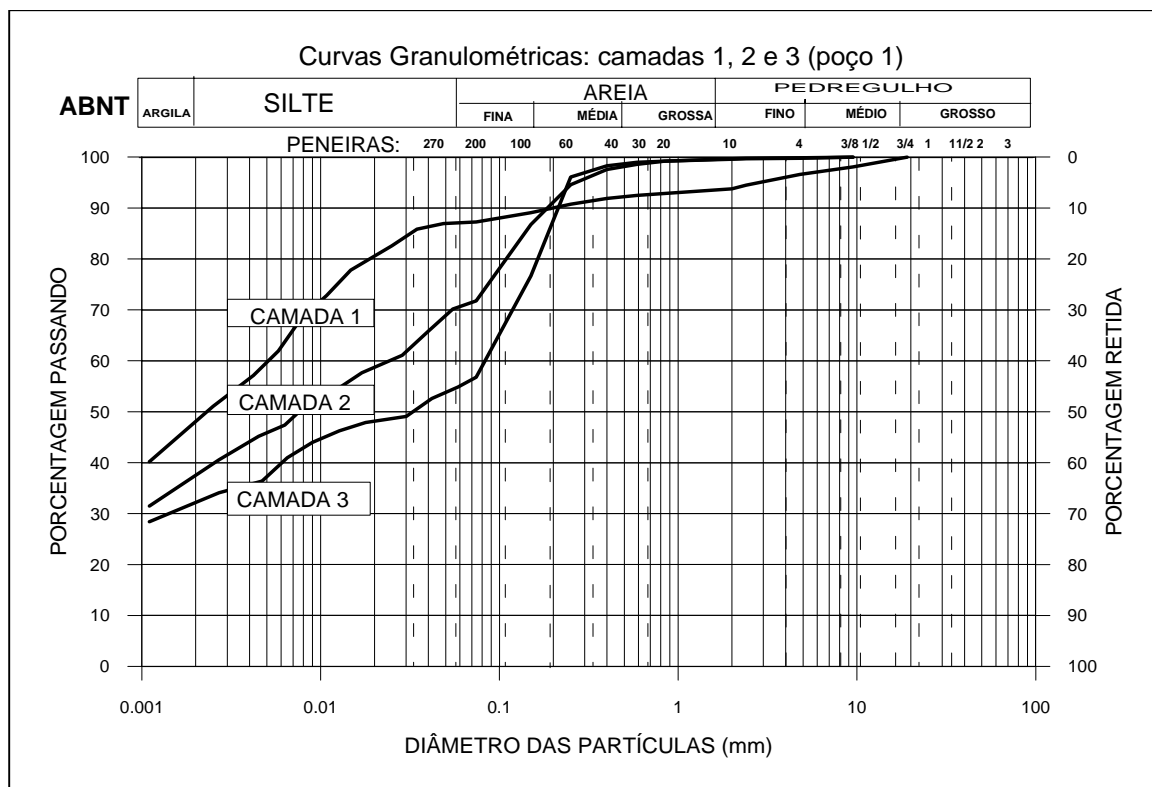


Figura 7 - Curvas granulométricas dos solos abaixo do aterro

As curvas granulométricas indicam uma acentuada presença de argila nas três camadas, podendo-se classificar o solo, de uma forma geral, como um silte argiloso que, sob certas condições técnicas de utilização, poderia se constituir numa boa base para um aterro de resíduos sólidos.

#### Solo da primeira camada

Trata-se de uma camada com aproximadamente 2,0 m de espessura, de solo composto por 49% de argila, 39% de silte, 6% de areia e 6% de pedregulho fino e médio, caracterizada como argila siltosa e CH pelo sistema unificado de classificação dos solos- USCS. Sua umidade inicial média foi medida como 22,09%.

#### Solo da segunda camada

A segunda camada apresenta-se com uma espessura de aproximadamente 2,0 m, sendo o solo amostrado composto por 38% de argila, 33% de silte e 29% de areia, caracterizado como CL.

#### Solo da terceira camada

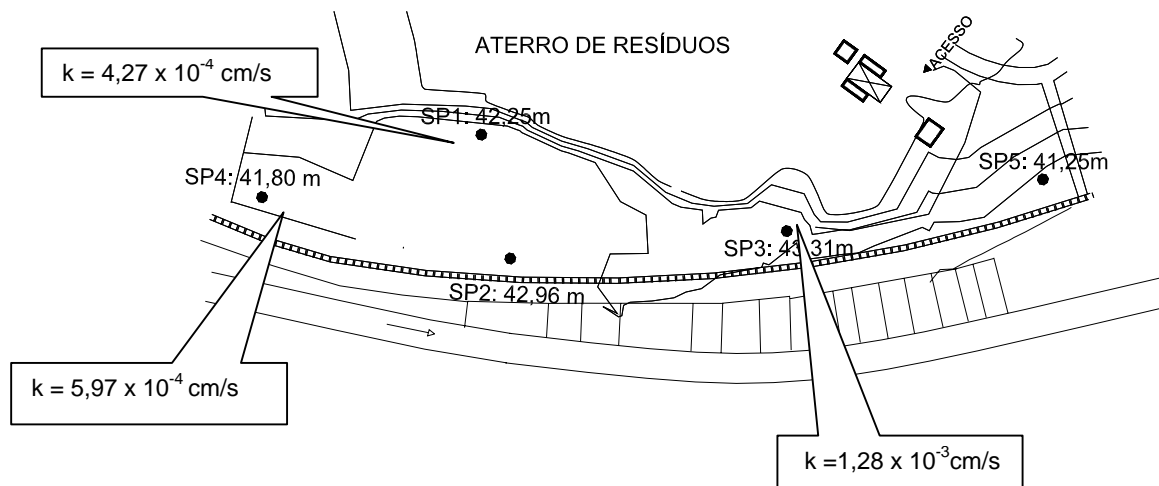
A terceira camada apresenta-se com o solo composto por 32% de argila, 33% de silte e 45% de areia, caracterizado como SC.

### 4.3.1.1.3 Permeabilidade

A permeabilidade foi determinada *in situ*, em três pontos da área representativa da base do aterro, com a utilização do permeâmetro Guelph.

A operação do permeâmetro mostrou-se muito prática, operado com facilidade, e com resultados bastante representativos uma vez que o ensaio é realizado diretamente no solo, com resultados imediatos.

Os valores obtidos são típicos de um solo siltoso bastante permeável, da ordem de  $k = 5 \times 10^{-4}$  cm/s em dois pontos ensaiados. No entanto o resultado do ponto SP<sub>3</sub> foi considerado atípico em relação ao observado no restante da área, tendo-se concluído que o solo apresentou sinais de estar misturado com lixo antigo o que teria interferido nas condições de permeabilidade daquela área. Para efeito da caracterização nesta pesquisa foi considerada uma permeabilidade do solo da base do aterro da ordem de  $10^{-4}$  cm/s.



**Figura 8 - Permeabilidade do solo do aterro**

#### 4.3.1.2 CARACTERIZAÇÃO DOS CONTAMINANTES DE INTERESSE:

##### 4.3.1.2.1 Gases gerados no aterro

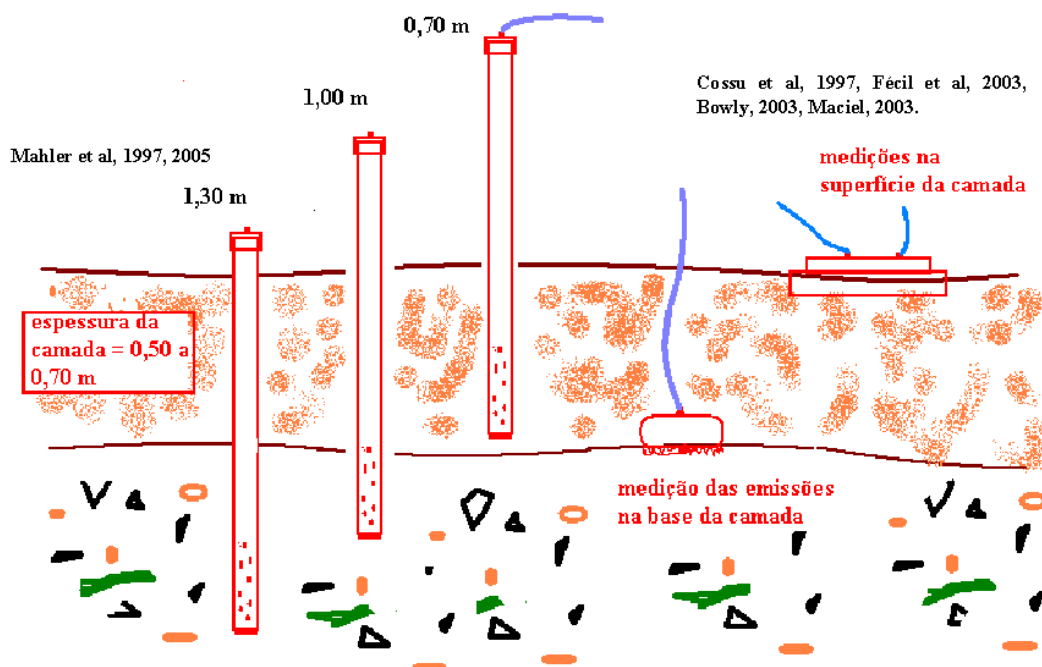


Figura 9 - Montagem dos drenos na camada de cobertura prevista

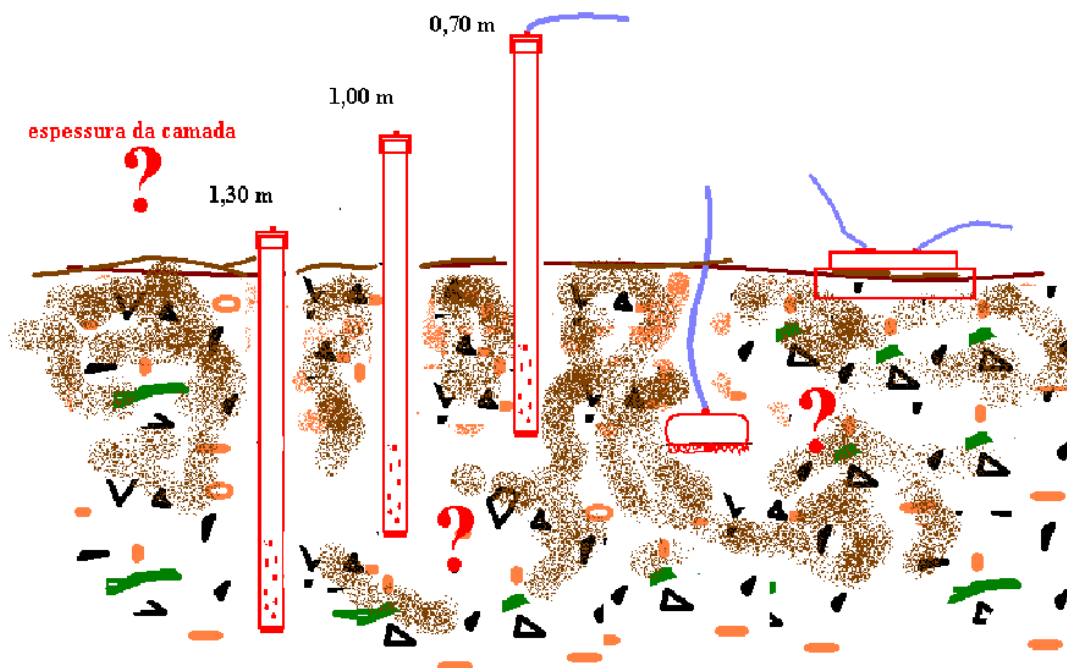


Figura 10 - Montagem dos drenos na camada de cobertura encontrada

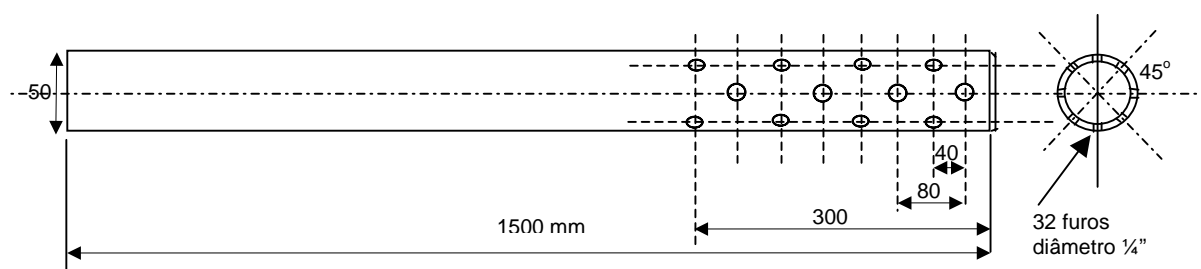
#### 1. Campanha de 11/11/2004

Nesse dia foi instalada uma estação de monitoramento de gases (estação A) e iniciada a montagem da estação B. Foram realizadas medições de gases nos drenos da estação de monitoramento A, diretamente nos três drenos existentes (A-0.70, A-1.0 e A-1.30) e do dispositivo de medição de pressão e concentração da base da cobertura.

### **Equipamentos e dispositivos utilizados:**

#### **a) Drenos de gases**

Dreno fabricado a partir de tubo de PVC de diâmetro externo de 50 mm, parede de 2 mm, vara de três metros de comprimento. Cada vara foi dividida em dois pedaços de 1500 mm resultando em dois tubos para drenos. Cada tubo de drenagem de gases de 1500 mm de comprimento recebeu 32 furações de  $\frac{1}{4}$ " ao longo de 300 mm da parte inferior do dreno, dispostos em 8 fileiras de 4 furos cada, separados longitudinalmente de 80 mm. Cada fileira foi defasada da seguinte de  $45^\circ$  e de 40 mm na vertical. A parte inferior do dreno que contém os furos de drenagem, foi fechada através de dobramento a quente de 40 mm da sua ponta. Dessa forma a área de drenagem de cada dreno, pelo somatório dos furos realizados, foi de  $1.014 \text{ mm}^2$ .



**Figura 11 - Dreno de gases modelo JLG-1104**

#### **b) Dispositivo para medição de pressão, concentração e temperatura dos gases (DMPC) abaixo da camada de cobertura**

Constituído por um cap de PVC de diâmetro nominal de 150 mm, do tipo para sistemas de esgoto. Nesse cap foi adaptado através de furo e colagem, um bico em latão para conexão de mangueiras de 4,5 mm de diâmetro interno. Acompanham o dispositivo, mangueira plástica com comprimento de 2 m, tela de arame galvanizado de malha quadrada 10 mm fio 1 mm, brita no. 3. Este dispositivo teve como referência construtiva o desenvolvido por Maciel (2003), com algumas adequações.

#### **c) Monitor de gases**

Foi utilizado o monitor multi-gás modelo Miniwarn, versão do software 1.10/2.nn, da Dräger Indústria e Comércio.

CONHECENDO O MINIWARN  
COMPONENTES FRONTAIS DO MINIWARN



DRÄGER SAFETY • CURSO DE FORMAÇÃO DO MINIWARN  
ABRIL, 2004 • 4/79

Drägersafety

**Figura 12 - Monitor de Gases Dräger modelo Miniwarn**

Nessa campanha foi utilizado o monitor com a seguinte configuração dos sensores:

- Tela de medições A:
  - % LEL CH<sub>4</sub>: sendo que 100% LEL = 4,4% em volume
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.
- Tela de medições B:
  - %Vol. CH<sub>4</sub> correspondente a 4,4%vol.
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.

**d) Medidor de temperatura**

Termômetro digital modelo Gulterm 200, tipo Pt-100, range -199,9...+199,9 °C, da Gultron do Brasil Ltda.

**e) Cronômetro**

Cronômetro digital com precisão 0,01 segundo.

**f) Mangueiras**

Mangueira plástica tipo cristal diâmetro de ¼” com parede de espessura 1 mm, diâmetro interno de 4,35 mm, para conexão dreno para o medidor.

#### **g) Outros itens**

- Trado manual diâmetro 60 mm, com extensão para 1,5 m;
- Seringa hipodérmica de 20 ml graduada para coleta eventual dos gases diretamente na cuba ou de outros locais;
- Válvula plástica três vias para acoplamento na seringa e coleta de gases para cromatografia gasosa;
- Etiquetas;
- Caneta para retroprojeter nas cores azul e vermelha;
- Caixa de isopor com gelo e sacos plásticos para acondicionamento das seringas com os gases coletados;
- Enxada
- Pá
- Cavadeira tipo bola de 1,50 m;
- Rolo de fita adesiva para pintura Scotch 48 mm x 50 m
- Cola Loctite 496 20g
- Adesivo para PVC Tigre bisnaga 75g
- Máscara contra poeiras
- Luva em PVC com forro comprimento 55 cm
- Luva tricotada em algodão 3 fios
- Guarda-sol
- Filtro solar
- Chapéu com protetor solar da nuca
- Garrafão com água
- Banco de madeira
- Mesa para suporte de instrumentos e anotações
- Prancheta
- álcool

**Tabela 4 - Relação básica de materiais para realização de medições de gases  
Procedimentos realizados**

- 1) Foram locadas na superfície do aterro duas estações de monitoramento de gases. A estação “A” localizada na parte central do aterro e junto à borda no lado mais recente. A estação “B” localizada na parte mais antiga do aterro, a aproximadamente 70 m da estação A.



**Foto 1 - Vista geral do aterro com as estações A, B, e C**

- 2) Cada estação foi projetada possuindo três drenos de gases do tipo JLG-1104, montados nas profundidades 0,70 m, 1,00 m e a 1,30 m. Além desses foi incluída a montagem de um dispositivo para medir a concentração e pressão dos gases na base da camada de argila da cobertura;
- 3) Na estação A foram realizados os furos para montagem dos drenos com o auxílio de trado manual de diâmetro 60 mm, cavadeira, pá, enxada e, especialmente para o tipo de terreno de prospecção como o de aterros de lixo, uma perfuratriz motorizada com acionamento por motor de 2 tempos, com broca de 1,00 m de comprimento e 200 mm de diâmetro. Essa perfuratriz foi utilizada onde não era possível realizar o furo com o trado (ou se tornava muito difícil) devido aos tipos de resíduos encontrados no local. São necessários dois homens para operá-la (às vezes até de um terceiro para ajudar a segurar a máquina) e, mesmo assim, com alto grau de dificuldade em alguns casos. Quando foi utilizada a perfuratriz, em vista de que a máxima profundidade atingida era de 1 metro, foi necessário continuar o afundamento com o auxílio da cavadeira (equipamento muito útil nesses casos pelo seu efeito de impacto pelo próprio peso e pelo lançamento realizado pelo operador) assim como do seu efeito de cisalhamento dos resíduos, já que possui uma lâmina afiada e larga na ponta (forjamento do próprio aço do corpo da cavadeira).



**Foto 2 - Início das perfurações na Estação A**



**Foto 3 - conjunto de ferramentas para perfuração**



**Foto 4 – Perfuratriz utilizada.**



**Foto 5 - complemento do furo com o trado**



**Foto 6 - Dreno de gases A-1.30 instalado**

- 4) Após a instalação dos três drenos foi perfurada a camada de cobertura em 0,50 m com um diâmetro de aproximadamente 25 cm. Nesse furo, foi considerado que foi atingida a base da camada de cobertura, já que não é possível identificar completamente o final da camada. Isto ocorre em vista da operação de espalhamento da argila, que não é muito técnica nem muito uniforme ao longo do aterro. No furo executado foi montado um dispositivo de medição de pressão e concentração dos gases.



**Foto 7 - colocação de brita no furo do DMPC**



**Foto 8 - Dispositivo com a tela montada**



**Foto 9 - DMPC alojado na base da camada de cobertura**



**Foto 10 - compactação da argila no DMPC**



**Foto 11 - Estação A pronta para início das medições**

- 5) As medições foram realizadas na estação de monitoramento A , composta de três drenos de gases conforme já descrita anteriormente;
- 6) Foi montado o cap de captação dos gases (com bico para mangueira) no topo de cada dreno a ser medido.
- 7) Utilizando-se a faixa de medição de 0-100% LEL  $\text{CH}_4$ , foram realizadas as medições de metano, gás sulfídrico, gás carbônico e oxigênio, registrando-se as concentrações no momento em que era ultrapassado o limite LEL do metano (4,40%vol). Da mesma forma foram realizadas medições logo após mudando para a tela de medição com faixa do metano em volume percentual (0 – 4,40%vol.  $\text{CH}_4$ );
- 8) Foram medidas as temperaturas, ambiente e dos gases, no interior dos drenos;

## **resultados**

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NOS DRENOS EM 11/11/2004							
DRENO	teste	CH <sub>4</sub> % LEL		H <sub>2</sub> S ppm	O <sub>2</sub> %	CO <sub>2</sub> - %	temperatura gás
		0 a 100%	0 a 4,40% em volume	(ppm)	(% volume)	(% em volume)	
A-1.30	1	>100		1	18,3	2,2	29,4
	2	>100		4	14,6	4,7	29,4
	3		>4,40	1	18,0	2,7	29,4
	4		>4,40	4	14,8	>5,0	29,4
A-1.00	1	>100		0	13,9	>5,0	29,6
	2		>4,40	0	14,0	>5,0	29,6
A-0.70	1	>100		0	16,6	>5,0	28,6
	2		>4,40	0	16,1	>5,0	28,6
DMPC A 0.50	1	>100		0	16,2	>5,0	
	2		>4,40	0	17,5	>5,0	
obs.: temperatura ambiente 31,4oC / Início: 14:00 h Término: 16:10 h							

**Tabela 5 -Resultados das medições 11/11/04**

Obs.: os resultados indicando maior do que 100% e maior do que 4,4% na segunda coluna significam que a faixa de medição calibrada no aparelho foi excedida. Isto ocorre porque este aparelho não tinha condições para calibração até 100% em volume de metano.

Observa-se nos resultados obtidos com a utilização do equipamento Drager Miniwarn, que em todos os casos, tanto nos drenos a 0,50 m quanto nos de 0,70, 1,0 e 1,2 metros, foi constatada a presença de gases. Isto também predominou nas campanhas seguintes.

Esses resultados serviram para identificar a presença de biogás e os gases de interesse da pesquisa sendo emitidos no local dos drenos para, na seqüência, serem realizadas as coletas para análise cromatográfica em laboratório, cujos resultados são apresentados no capítulo.

Na evolução das pesquisas foi identificada a possibilidade e providenciada a conversão e calibração do aparelho para medições de metano até concentrações de 100% em volume, o que permitirá nas próximas pesquisas a medição das concentrações de metano no próprio local do aterro de RSU. Isto servirá para ampliar as medições e conclusões sobre emissão de gases, inicialmente comparando-as com os resultados de cromatografia e, posteriormente, com o aparelho bastante confiável, realizar um número bem maior de medidas diretamente no campo. Dessa forma as investigações serão mais representativas, de custo bem menor, mais ágeis, e podendo identificar áreas com maior impactação rapidamente.

## **2) Campanha de 25/11/2004**

Nesse dia foi instalada uma estação de monitoramento de gases (estação A) e iniciada a montagem da estação B. Foram realizadas medições de gases nos drenos da estação de monitoramento A, diretamente nos três drenos existentes (A-0.70, A-1.0 e A-1.30) e do dispositivo de medição de pressão e concentração da base da cobertura.

### **Equipamentos e dispositivos utilizados:**

#### **a) Drenos de gases**

Dreno fabricado a partir de tubo de PVC de diâmetro externo de 50 mm, parede de 2 mm, vara de três metros de comprimento, conforme descrito anteriormente.

#### **b) Dispositivo para medição de pressão e temperatura dos gases abaixo da camada de cobertura**

Constituído por um cap de PVC de diâmetro nominal de 150 mm, do tipo para sistemas de esgoto, conforme descrito anteriormente.

#### **c) Monitor de gases**

Foi utilizado o monitor multi-gás modelo Miniwarn, versão do software 1.10/2.nn, da Dräger Indústria e Comércio.

Nessa campanha foi utilizado o monitor com a seguinte configuração dos sensores:

- Tela de medições A:
  - % LEL CH<sub>4</sub>: sendo que 100% LEL = 4,4% em volume
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.
- Tela de medições B:
  - %Vol. CH<sub>4</sub> correspondente a 4,4%vol.
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.

#### **d) Medidor de temperatura**

Termômetro digital modelo Gulterm 200, tipo Pt-100, range -199,9....+199,9 °C, da Gulton do Brasil Ltda.

**e) Cronômetro**

Cronômetro digital com precisão 0,01 segundo.

**f) Mangueiras**

Mangueira plástica tipo cristal diâmetro de ¼" com parede de espessura 1 mm, diâmetro interno de 4,35 mm, para conexão dreno para o medidor.

**g) Outros itens**

Conforme listagem apresentada anteriormente.

**Procedimentos realizados**

- 1) As medições foram realizadas na estação de monitoramento A , composta de três drenos de gases conforme já descrita anteriormente;
- 2) Foram montados os drenos e o dispositivo de medição de pressão e concentração na estação B, e realizadas medições.
- 3) Utilizando-se a faixa de medição de 0-100% LEL CH<sub>4</sub>, foram realizadas as medições de metano, gás sulfídrico, gás carbônico e oxigênio, registrando-se as concentrações no momento em que era ultrapassado o limite LEL do metano (4,40%Vol). Da mesma forma foram realizadas medições logo após mudando para a tela de medição com faixa do metano em volume percentual (0 – 4,40%Vol. CH<sub>4</sub>);
- 4) Foram medidas as temperaturas ambiente e dos gases no interior dos drenos;

**Tabela 6 - Resultados das medições da segunda campanha**

RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NOS DRENOS EM 25/11/2004							
DRENO	teste	CH <sub>4</sub> % LEL		H <sub>2</sub> S ppm (ppm)	O <sub>2</sub> % (% volume)	CO <sub>2</sub> - % (% em volume)	temperatura gás
		0 a 100%	0 a 4,40% em volume				
B-1.30	1	41,5		1	18,7	1,4	28
	2	39,5		2	18,4	1,5	28
	3		1,90	1	18,5	1,5	28
	4		1,78	2	18,4	1,6	28
C-5.00	1	0		0	20,6	0,0	29,3
	2		0	0	20,6	0,0	29,3
EXTERNA	1	0		0	20,6	0,0	37,3
	2		0	0	20,6	0,0	37,3

obs.: Início: 13:05 h Término: 13:50 h

### **3) Campanha de 02/02/2005**

Nesse dia foram realizadas medições de gases nos drenos da estação de monitoramento A, diretamente nos três drenos existentes (A-0.70, A-1.0 e A-1.30).

#### **Equipamentos e dispositivos utilizados:**

##### **a) Medidor de gases**

Foi utilizado o medidor Dräger Miniwarn com a seguinte configuração dos sensores:

- Tela de medições A:
  - % LEL CH<sub>4</sub>: sendo que 100% LEL = 4,4% em volume
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.
- Tela de medições B:
  - %Vol. CH<sub>4</sub> correspondente a 4,4%vol.
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.

##### **b) Medidor de temperatura**

Termômetro digital modelo Gulterm 200, tipo Pt-100, range -199,9....+199,9 °C, da Gultron do Brasil Ltda.

##### **c) Medidor de vazão**

Medidor de vazão de gases modelo G-1 da LAO, vazão máxima: 1,7 m<sup>3</sup>/h, mínima de 0,016 m<sup>3</sup>/h, pressão máxima 50kPa, mínima N.I., precisão de 0,2 dm<sup>3</sup>, mostrador em m<sup>3</sup>.

##### **d) Cronômetro**

Cronômetro digital com precisão 0,01 segundo.

##### **e) Mangueiras**

Mangueira plástica tipo cristal diâmetro de ¼" com parede de espessura 1 mm, diâmetro interno de 4,35 mm, para conexão dreno para o medidor.

##### **f) Outros itens**

- Seringa hipodérmica de 20 ml graduada para coleta eventual dos gases diretamente na cuba ou de outros locais;
- Enxada
- Pá
- Rolo de fita adesiva para pintura Scotch 48 mm x 50 m

- ❑ Cola Loctite 496 20g
- ❑ Adesivo para PVC Tigre bisnaga 75g
- ❑ Máscara contra poeiras
- ❑ Luva em PVC com forro comprimento 55 cm
- ❑ Luva tricotada em algodão 3 fios
- ❑ Guarda-sol
- ❑ Filtro solar
- ❑ Chapéu com protetor solar da nuca
- ❑ Garrafão com água
- ❑ Banco de madeira
- ❑ Mesa para suporte de instrumentos e anotações
- ❑ Prancheta
- ❑ álcool

### **Procedimentos realizados**

- As medições foram realizadas na estação de monitoramento A , composta de três drenos de gases conforme já descrita anteriormente;
- Foi montado o cap de captação dos gases (com bico para mangueira) no topo do dreno da vez a ser medido e, montado em série com o medidor Miniwarn, e antes dele, foi acoplado o medidor de vazão de gases;
- O teste teve início com montagem da capa especial de borracha no medidor Miniwarn para receber os gases oriundos do dreno e que passaram pelo medidor de fluxo, e foi iniciada a cronometragem.
- Utilizando-se a escala de 0-100% LEL CH<sub>4</sub>, foram realizadas as medições de metano, gás sulfídrico, gás carbônico e oxigênio, registrando-se as concentrações e os tempos nos quais os limites foram atingidos.
- Foram medidas as temperaturas ambiente e dos gases no interior dos drenos;

**Tabela 7 - Resultado das medições terceira campanha**

<b>RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO DRENO A-0.7 EM 02.02.2005</b>											
teste	CH4 % LEL		H2S ppm		O2 %vol		CO2 - %			temperatura gás	pressão (mm H2O)
	tempo reação CH4 (s)	tempo LEL CH4 4,4% (s)	inicial	final	inicial	final	inicial	%CO2 quando atingiu LEL CH4	tempo CO2 5% (s)		
1	60	170	0	3	20,6	13,5	1,2	1,9	220	30,6	1
2	67	200	0	6	20,3	12,8	1,4	2,2	253	31,4	1
3	56	242	0	2	20,5	12,4	1,4	1,8	420	31,8	1
4											
5											

obs.: temperatura ambiente 33 - 36oC / Início: 12:37 h Término: 13:20 h

<b>RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO DRENO A-1.0 EM 02.02.2005</b>											
teste	CH4 % LEL		H2S ppm		O2 %vol		CO2 - %			temperatura gás	pressão (mm H2O)
	tempo reação CH4 (s)	tempo LEL CH4 4,4% (s)	inicial	final	inicial	final	inicial	%CO2 quando atingiu LEL CH4	tempo CO2 5% (s)		
1	10	15	3	32	19,9	1,1	3,0			28,6	
2	10	16	3	32	20,0	1,4	2,7			28,6	
3	10	20	2	31	20,0	1,6	2,8			28,6	
4	10	20	3	29	19,6	2,5	2,9			28,6	
5	10	16	3	31	20,0	1,5	2,8			28,6	

obs.: temperatura ambiente 33 - 36oC / Início: 12:37 h Término: 13:20 h

<b>RESULTADOS DAS MEDIÇÕES NO DRENO A-1.3 EM 02.02.2005</b>											
teste	CH4 % LEL		H2S ppm		O2 %vol		CO2 - %			temperatura gás	pressão (mm H2O)
	tempo reação CH4 (s)	tempo LEL CH4 4,4% (s)	inicial	final	inicial	final	inicial	%CO2 quando atingiu LEL CH4	tempo CO2 5% (s)		
1	7	12	2	3	20,1	1,8	3,0	3,0	25	30,5	
2	7	12	2	3	20,0	2,1	3,0	2,9	30	30,5	
3	7	11	2	3	20,1	1,9	2,9	2,8	28	30,5	
4	7	10	2	3	19,7	1,3	3,0	3,0	26	30,5	
5	7	12	2	3	19,9	1,3	3,0	2,9	29	30,5	

obs.: temperatura ambiente 33 - 36oC / Início: 12:37 h Término: 13:20 h

#### **4) Campanha de 11/02/2005**

Nesse dia foram realizadas medições de gases na superfície do aterro, nos drenos da estação A, e nos seus taludes.

#### **Equipamentos e dispositivos utilizados:**

##### **a) Medidor de gases**

Foi utilizado o medidor Dräger Miniwarn com a seguinte configuração dos sensores:

- Tela de medições A:
  - % LEL CH<sub>4</sub>: sendo que 100% LEL = 4,4% em volume
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.
- Tela de medições B:
  - %Vol. CH<sub>4</sub> correspondente a 4,4%vol.
  - ppm H<sub>2</sub>S;
  - % O<sub>2</sub>;
  - % CO<sub>2</sub> com display até 5%vol.

##### **b) Medidor de temperatura**

Termômetro digital modelo Gulterm 200, tipo Pt-100, range -199,9....+199,9 °C, da Gultron do Brasil Ltda.

##### **c) Manômetro**

Manômetro do tipo comum, modelo Canny 1002 de fabricação Engevalle, com ramos plásticos de diâmetro interno 4,35 mm e faixa de medição de 200 mm, precisão de 1 mm, leitura direta em milímetros de coluna d'água.

##### **d) Cronômetro**

Cronômetro digital com precisão 0,01 segundo.

##### **e) Câmara de captação de gases**

Utilização de cuba metálica em aço inox, parede de 1 mm, comprimento 540, largura 320, altura 110 mm, possuindo uma conexão em PVC tipo cap tipo esgoto modelo DN 50 da Tigre montado no centro da face horizontal da cuba. No cap foi montado e colado um bico em latão para conexão de mangueira tipo cristal de diâmetro interno 4,5 mm. Também existe no cap um furo para adaptação temporária do sensor de temperatura do termômetro digital. Esse furo, quando fora de uso, é tamponado com fita adesiva especial Scotch para pintura.

#### f) Mangueiras

Mangueira plástica tipo cristal diâmetro de ¼” com parede de espessura 1 mm, diâmetro interno de 4,35 mm, para conexão da cuba de captação dos gases para o medidor e manômetro.

#### g) Outros itens

Conforme relacionado anteriormente.

#### Procedimentos realizados

- 1) As medições principais foram realizadas na estação A , composta de três drenos de gases conforme já descrita anteriormente, cujo terreno em volta dos drenos foi limpo com o auxílio de uma enxada, e aplainando o melhor possível a área no entorno dos drenos;
- 2) Foi colocada a cuba de captação dos gases sobre o dreno A-1.0 (de 1 metro de profundidade), simultaneamente à conexão da mangueira da cuba ao medidor de gases Miniwarn, dando início cronometrado da medição dos gases.
- 3) Utilizando-se a escala de 0-100% LEL CH<sub>4</sub>, foram realizadas as medições de metano, gás sulfídrico, gás carbônico e oxigênio, registrando-se os tempos e as concentrações.
- 4) Foram medidas as temperaturas ambiente e dos gases no interior da cuba;
- 5) Foram medidas as pressões manométricas dos gases na cuba;

**Tabela 8 - Resultados das medições terceira campanha**

teste	CH <sub>4</sub> % LEL		H <sub>2</sub> S ppm		O <sub>2</sub> %vol		CO <sub>2</sub> - %			temp eratu ra gás	press ão (mm H <sub>2</sub> O)
	tempo reaçao CH <sub>4</sub> (s)	tempo LEL CH <sub>4</sub> 4,4% (s)	inicial	final	inicial	final	inicial	%CO <sub>2</sub> quando atingiu LEL CH <sub>4</sub>	tempo CO <sub>2</sub> 5% (s)		
1	60	170	0	3	20,6	13,5	1,2	1,9	220	30,6	1
2	67	200	0	6	20,3	12,8	1,4	2,2	253	31,4	1
3	56	242	0	2	20,5	12,4	1,4	1,8	420	31,8	1
4											
5											

obs.: temperatura ambiente 33 - 36oC / Início: 12:37 h Término: 13:20 h

### 4.3.2 RESULTADOS

Neste t3pico s3o realizadas as an3lises dos resultados das medi33es dos gases coletados no aterro de RSU de Paracambi, assim como a aplica33o de dois modelos para quantifica33o de emiss33es de metano, buscando-se uma compara33o das emiss33es calculadas.

#### 4.3.2.1 CROMATOGRAFIA DOS GASES COLETADOS

A seguir s3o apresentados os resultados da cromatografia de gases coletados no aterro com seringas e procedimentos apropriados, em duas campanhas, e levados para an3lise em laborat33rio.

**Tabela 9 - An3lise cromatogr3fica dos gases coletados no aterro**

TABELA CROMATOGR3FICA DOS GASES COLETADOS						
Amostras	% MOLAR				Data da coleta	observa33es
	Ar	CH <sub>4</sub>	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O		
PA-0.70A	18,80	71,59	9,61	0,00	11/11/04	coleta no topo
PA-0.70B	18,31	71,67	10,02	0,00		coleta no fundo
PA-1.00	24,43	65,92	9,65	0,00		
PA-1.30	19,66	71,11	9,22	0,00		
PB-1.00	64,44	29,71	5,85	0,00	25/11/04	
PC-5.00	99,69	0,00	0,31	0,00		coleta no topo
DMPC	27,21	64,48	8,40	0,00	11/11/04	
LEGENDA						
PA > posto de coleta A localizado na 3rea central do aterro						
PB > posto de coleta B localizado na 3rea mais antiga do aterro						
PC > posto de coleta C localizado na base do aterro						
0.70; 1.00; 1.30; 5.00 > profundidade em metros do tubo de drenagem						
DMPC > dispositivo de medi33o de press3o e concentra33o de gases						

Os resultados indicam de forma geral uma presen3a elevada de metano acima do indicado pelas fases de gera33o de biog3s (vide figura – Fases da Gera33o de Biog3s), e que corresponde a fase III-IV. Contudo o CO<sub>2</sub> observado foi de aproximadamente 10% v.v., o que teoricamente s3o seria atingido na fase V, que 3 a fase de matura33o, quando os n3veis, tanto de metano quanto de CO<sub>2</sub> declinam.

Destaque-se, no entanto, que aquelas fases apresentadas normalmente na literatura internacional como representativas do processo de gera33o de biog3s foram, na verdade, determinadas atrav3s da utiliza33o de lis3metros em laborat33rio, o que, no

mínimo, exige uma pesquisa mais aprofundada de seus resultados para então extrapolar para um cenário de campo.

Constata-se pois, que ainda há muito o que medir *in situ*, seja neste local, seja no tema gases em aterros de forma geral para, ou construir novas curvas de previsão ou desenvolver novos modelos de análise. Mahler et al.(2005) vem constatando em diversos aterros valores semelhantes e que reforçam esta necessidade de pesquisa mais aprofundada.

#### **4.3.2.2 CÁLCULOS DA GERAÇÃO DE BIOGÁS**

Buscando-se quantificar, mesmo que por estimativa, o volume de gases gerados no aterro de Paracambi, utilizou-se a aplicação de sistemáticas disponíveis para este objetivo. Foram então identificadas duas e realizadas as aplicações conforme descritas a seguir:

- Aplicação do modelo Scholl-Canyon sugerido pela metodologia do Banco Mundial (World Bank, 2004);
- Aplicação de metodologia proposta por LIMA (2002), utilizada para processos de biorremediação de lixões, portanto um processo acelerado de biodegradação;

##### **4.3.2.2.1 Modelo Scholl-Canyon**

O uso de modelos matemáticos é útil para a avaliação do potencial de geração de biogás num sítio de disposição de RSU. A partir da sua aplicação obtemos curvas de geração de gás num período de tempo. O parâmetro mais importante, e que é comum a todos, é a quantidade estimada do resíduo passível de decomposição.

Outros parâmetros de insumo podem variar dependendo do modelo usado e são influenciados por muitas variáveis.

A natureza heterogênea dos resíduos e a variável tempo pós-disposição, em todos os tipos de aterros, resultam numa dificuldade significativa para a coleta de dados representativos das condições específicas do aterro.

Usando-se os valores-limite superiores e inferiores de fluxo, numa pesquisa de geração de biogás versus o perfil de tempo, e assumindo condições prováveis da massa de resíduos dentro do aterro, é possível designar valores de projeto que são adequados para uso na avaliação do potencial de geração, assim como de quaisquer fatores de risco que possam ser aplicáveis.

Modelos cinéticos de primeira ordem são usados freqüentemente para avaliar a produção de metano durante a vida de um aterro. Esses modelos são adaptados para aterros específicos por numerosas presunções sobre condições no aterro. O modelo empírico mais amplamente aceito da decomposição, de primeira ordem, e usado pela indústria e por agências reguladoras, inclusive a EPA (1996), é o relativamente simples e objetivo Modelo Scholl Canyon.

Este modelo está baseado na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de massa de resíduos depositada (fator  $L_o$ ). Sua equação de primeira ordem é dada abaixo:

$$Q_{CH_4i} = k * L_o * m_i * (e^{-kc} - e^{-kt})$$

- $Q_{CH_4i}$  = metano produzido no ano  $i$  a partir da seção  $i$  do resíduo
- $k$  = fator constante, da geração de metano
- $L_o$  = potencial da geração de metano
- $m_i$  = massa de resíduo despejada no ano  $i$
- $t$  = tempo em anos decorrido desde o início da operação do aterro.
- $c$  = tempo em anos após o fechamento do aterro ( $c=0$  durante todo o tempo de operação).

O potencial de geração de metano ( $L_o$ ) representa a produção total, em  $m^3$  de metano por tonelada de lixo. Depende da composição gravimétrica do lixo e, principalmente, da matéria orgânica presente.

Valores típicos para este parâmetro variam de 125 a 310  $m^3$  de metano/tonelada de resíduo depositado no aterro (World Bank, 2004).

O usuário do modelo pode aumentar ou diminuir o  $L_o$  para refletir um maior conhecimento específico seu na caracterização do lixo, principalmente no que se refere aos conteúdos maiores ou menores de lixo orgânico existentes na massa. Um valor típico adotado é de  $L_o$  igual a 170  $m^3$ /tonelada de lixo depositado.

A quantidade (em toneladas) de lixo típico aterrado num ano em particular é representada por “ $m$ ” na equação do Modelo Scholl Canyon.

A designação pré-estabelecida para o  $L_o$  já reconhece que há uma mistura de resíduos orgânicos que podem ser decompostos, e de resíduos inorgânicos, sendo depositados num aterro típico. Se houver bons dados em relação às suas quantidades e dos tipos de resíduos, pode ser possível refinar a avaliação da modelagem. Seria então necessário tornar a avaliação de geração de biogás global uma soma das curvas geradas para os vários tipos de resíduo.

A constante, taxa de geração de metano ( $k$ ), representa a taxa de decomposição biológica de primeira ordem à qual o metano é gerado depois da disposição do resíduo. Esta constante é influenciada pelo teor de umidade da massa de resíduos, pela disponibilidade de nutrientes nela existente, pelo seu pH e pela

temperatura dessa massa. Valores típicos de k variam de 0,02 para aterros secos a 0,07 para aterros molhados.

**Tabela 10 - Valores da EPA (1996) para constante da geração de metano**

Precipitação anual	Campo dos valores k		
	Relativamente inerte	Moderadamente degradável	Altamente degradável
< 250 mm	0,01	0,02	0,03
> 250 e < 500 mm	0,01	0,03	0,05
> 500 e < 1000 mm	0,02	0,05	0,08
> 1000 mm	0,02	0,06	0,09

O valor normalmente utilizado nos cálculos realizados pela USEPA para aterros com mais do que 25 polegadas (625 mm) de precipitação por ano é de 0,05 (USEPA, 1996).

A seguir apresenta-se a curva gerada com a aplicação do modelo Scholl-Canyon usando os valores sugeridos pela USEPA: ( $k=0,05$ ,  $L_0=170 \text{ m}^3$  de metano por tonelada de resíduo depositada), para o aterro de Paracambi.

Para este estudo de caso, e considerando a simplificação do modelo aplicado, foi considerada uma taxa constante de disposição de resíduos para efeito do cálculo, de 10.000 toneladas por ano, em média, até a data atual.

Este valor foi calculado considerando:

- as dimensões atuais do aterro, de aproximadamente 120 metros de largura por 320 metros de comprimento (dimensão maior paralela à estrada), totalizando  $38.400 \text{ m}^2$ ;
- a altura média de aterramento, considerada de 5 (cinco) metros em média;
- as considerações de peso específico do lixo depositado neste aterro, assim como de sua composição gravimétrica, conforme observações e valores encontrados por Mahler (2003), Schueler (2005), Silveira (2004) e Oliveira et al.(2002) para o município de Paracambi;

Dessas considerações resulta:

- Escolha do valor de peso específico da massa de lixo depositada naquele aterro, de  $1,37 \text{ toneladas/m}^3$ ;
- Do cálculo: área de  $38.400 \text{ m}^2$  x altura média da massa de 6,5 metros x peso específico de  $1,37 \text{ ton/m}^3$  = peso total de lixo depositado-compactado de 341.952 toneladas;
- Apesar de o início da disposição de lixo datar de meados dos anos 60, e de que posteriormente durante uns 4 anos ter funcionado uma usina de reciclagem no local o que diminuiu a quantidade de lixo depositado, foi

considerado para efeito de cálculo o ano de 1980 como início do processo para efeito de aplicação da média. Daí resulta que o ano 25 do processo de disposição teria sido 2004. A partir daí considerou-se o fechamento do lixão e realizou-se a análise no que se refere à geração de metano;

- Considerando a estimativa total de lixo depositado em 25 anos (1980 – 2004) de toneladas, resulta uma média anual de 13.678 toneladas;

Quanto às considerações relativas à composição gravimétrica representativa dos resíduos deste aterro de Paracambi, concluiu-se que, conforme foi caracterizado em aproximadamente 63% de matéria orgânica (material putrescível, facilmente degradável), 14% de papel/papelão (material moderadamente degradável), e 23% de materiais dificilmente degradáveis ou não-degradáveis resultou, através da utilização de método disponibilizado no modelo (World Bank, 2004), um fator de correção de tonelagem depositada em função da quantidade de resíduos inertes existente. Para o caso de Paracambi essa correção ficou em 75%, aplicada como um redutor na capacidade de geração de biogás pela massa de resíduos. Dessa forma, aplicando-se um redutor de 75% na tonelagem anual de 13.678 resulta 10.258 toneladas, reduzidas então para 10.000 para um efeito simplificador do cálculo e também conservativo.

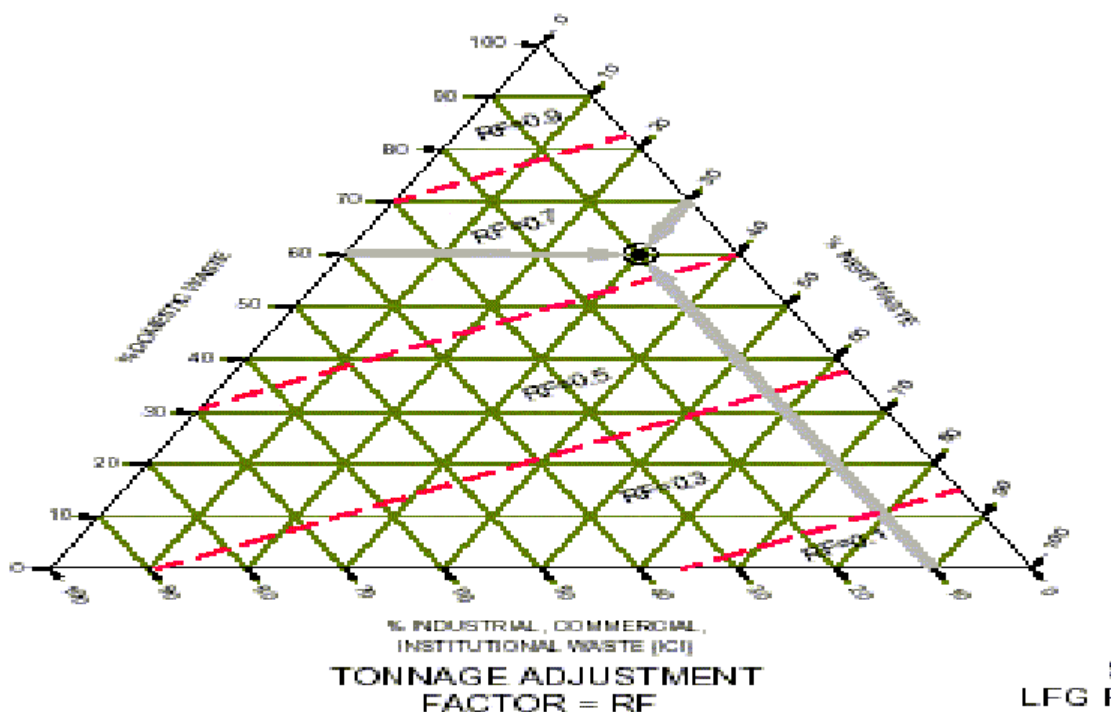


Figura 13 - Fator de correção para tonelagem depositada (World Bank, 2004)

É também muito importante destacar que, mesmo considerando que é prática comum presumir que o biogás gerado consiste de 50 por cento de metano e 50 por cento de dióxido de carbono, observou-se nas medições realizadas durante os trabalhos de campo e laboratório dessa pesquisa que os percentuais se mantiveram variando entre 60 a 70% de metano e 10 a 20% de dióxido de carbono nos gases coletados no aterro. Desta forma não se confirmaram até agora os valores estabelecidos e utilizados atualmente de forma geral na bibliografia e nos manuais utilizados para cálculos da geração de metano nos aterros de lixo. Isto também se mostra evidente e interessante para efeito de novas pesquisas e cálculos futuros, nos resultados das medições realizadas por Mahler (1997 e 2005).

Para efeito de cálculo dessa pesquisa, no entanto, foi mantida a proporção normalmente utilizada no modelo do Banco Mundial, em vista de não se ter ainda disponível conhecimento suficiente da variação desses parâmetros nas condições brasileiras, ressaltando-se no entanto que a tendência é de que esses valores aqui adotados sejam conservadores em relação ao que se pode encontrar nos ensaios de campo, no que se refere às taxas de emissões de metano.

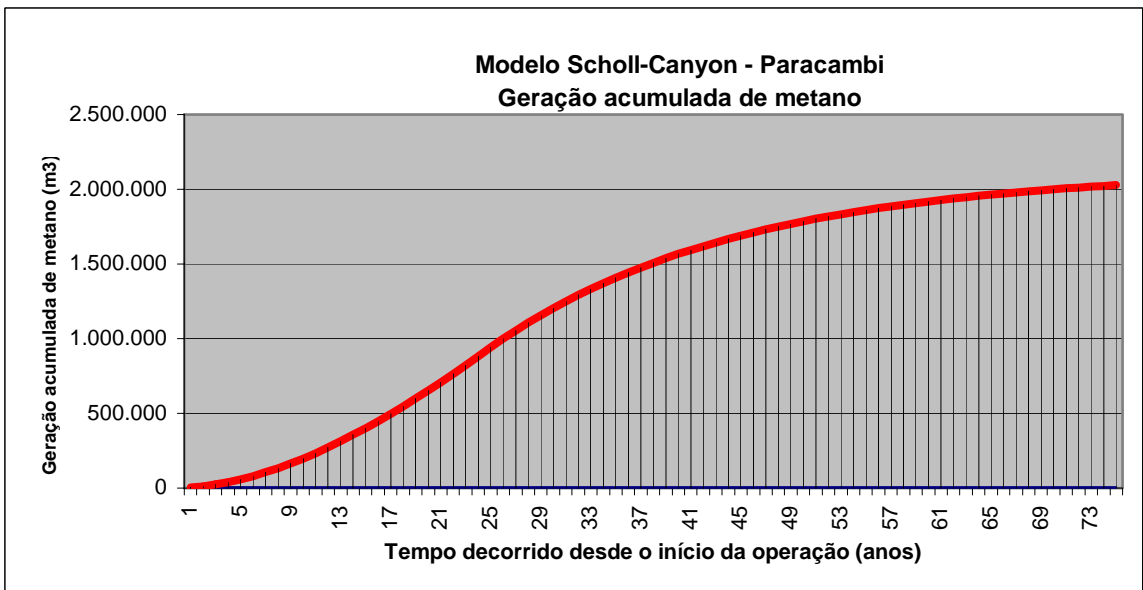
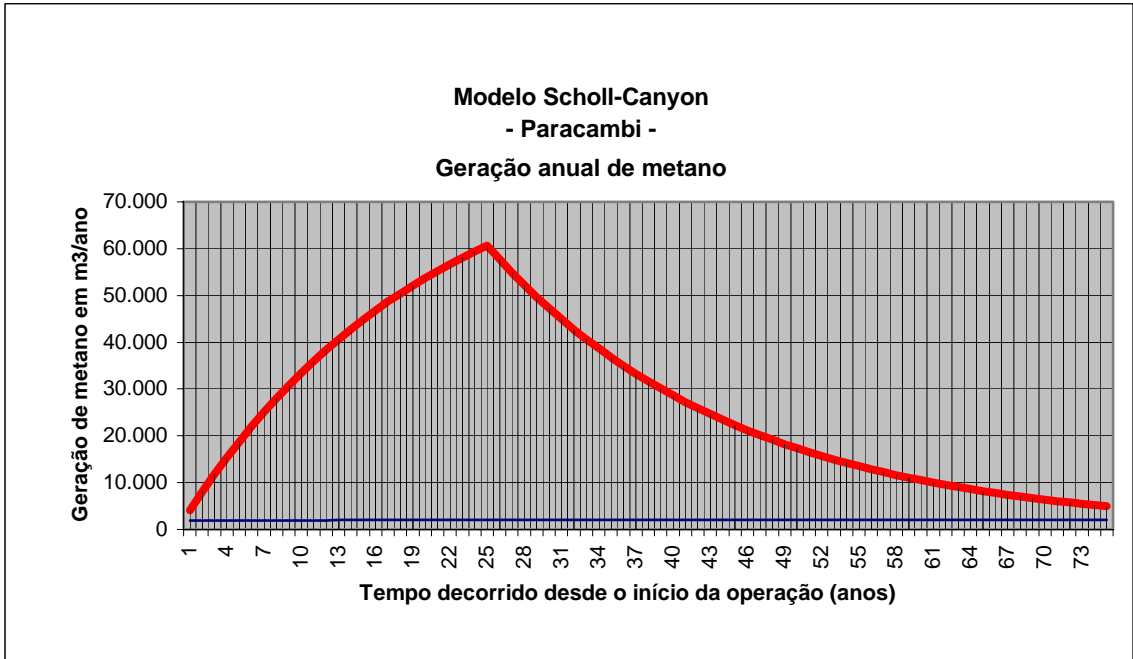
Entramos então na equação do modelo Scholl-Canyon com os valores de:

- $k = 0,05$ , considerando a condição pluviométrica da região acima de 1.000 mm/ano, e o tipo de cobertura permeável, o que configura um aterro molhado conforme a conceituação do modelo;
- $Lo = 170 \text{ m}^3$  de metano gerado por tonelada de lixo depositada, como capacidade do tipo de resíduo existente;
- $m_i = 10.000$  toneladas/ano de resíduos depositados, em média;
- $t_i = 1$  a 75 anos (tempo total da análise);
- $c = 1$  a 50 anos (tempo decorrido após o fechamento do aterro)
- tempo de operação do aterro = 25 anos.

Os resultados são apresentados na tabela a seguir e nas duas figuras com os gráficos do metano gerado por ano no aterro, e essa mesma produção em valores acumulados ao longo de 75 anos.

Tabela 11 - Aplicação do modelo Scholl-Canyon

Fator Constante da geração (k)	Potencial Geração de Metano (Lo)	Quant anual de resíduos (mi)	Tempo após fechto. (c)	Tempo desde início (t)	Ano	Geração de metano (QCH <sub>4</sub> )	
						Anual	Acumulado
-	m3/ton	ton/ano	anos	anos		m3	m3
0,05	170	10.000	0	1	1980	4.145	4.145
			0	2	1981	8.089	12.234
			0	3	1982	11.840	24.074
			0	4	1983	15.408	39.482
			0	5	1984	18.802	58.284
			0	6	1985	22.030	80.314
			0	7	1986	25.102	105.416
			0	8	1987	28.023	133.439
			0	9	1988	30.802	164.240
			0	10	1989	33.445	197.685
			0	11	1990	35.959	233.644
			0	12	1991	38.351	271.995
			0	13	1992	40.626	312.622
			0	14	1993	42.790	355.412
			0	15	1994	44.849	400.261
			0	16	1995	46.807	447.068
			0	17	1996	48.670	495.737
			0	18	1997	50.442	546.179
			0	19	1998	52.127	598.306
			0	20	1999	53.730	652.036
			0	21	2000	55.255	707.292
			0	22	2001	56.706	763.998
			0	23	2002	58.086	822.083
			0	24	2003	59.398	881.482
			0	25	2004	60.647	942.129
			1	26	2005	57.689	999.818
			2	27	2006	54.876	1.054.694
			.	.	.	.	.
			.	.	.	.	.
			.	.	.	.	.
			41	66	2045	7.807	1.972.723
			42	67	2046	7.427	1.980.150
			43	68	2047	7.064	1.987.214
			44	69	2048	6.720	1.993.934
			45	70	2049	6.392	2.000.326
			46	71	2050	6.080	2.006.407
			47	72	2051	5.784	2.012.191
			48	73	2052	5.502	2.017.692
			49	74	2053	5.233	2.022.926
			50	75	2054	4.978	2.027.904



**Figura 14 – Gráficos da aplicação do modelo Scholl-Canyon, com os valores calculados de geração de metano**

#### 4.3.2.2.2 Modelo Lima – Biorremediação

A biorremediação é um processo com uso de biotecnologia que utiliza microorganismos no tratamento de resíduos. É usada particularmente na remediação de passivos ambientais causados pela disposição inadequada de resíduos sólidos urbanos.

Em utilização a partir da década de 80 a biorremediação é considerada uma tecnologia inovativa na remediação de áreas degradadas, podendo ser utilizada *in situ* e *ex situ*.

Em termos biológicos especialistas tais como Lima (2002) e outros indicam resultados de aceleração do processo de degradação da massa de RSU em até dez vezes o processo normal ocorrendo num aterro sanitário, isto é, com a utilização de células anaeróbias .

Dentre os processos descritos na bibliografia a respeito elegemos um modelo de tratamento de gases gerados em aterros de resíduos, inserido num processo de biorremediação, para simular a geração de metano do aterro de Paracambi e comparar os resultados com os de Scholl-Canyon. O modelo escolhido foi o descrito e utilizado por Lima (2002).

Este modelo de produção de biogás tem como referência básica a composição gravimétrica do lixo a ser tratado, onde as parcelas de materiais biodegradáveis são as fontes potenciais de energia que servem de material básico aos microorganismos que atuam num processo de biodegradação.

Desta forma, utilizando a composição gravimétrica dos resíduos de Paracambi conforme apresentado por Silveira (2004), e a metodologia apresentada por Lima (2002), foram calculadas as parcelas dos resíduos segundo o seu grau de biodegradabilidade. Os resultados estão apresentados na tabela a seguir, indicando os percentuais de materiais facilmente degradáveis (FD), que se constitui basicamente da matéria orgânica putrescível, das parcelas (MD) moderadamente degradáveis, (DD) dificilmente degradáveis e (ND), não degradáveis.

As parcelas FD e MD se constituem no modelo as parcelas de interesse para efeito de medição dos gases gerados no aterro. Foi considerando que cada tonelada de resíduo depositada no aterro terá a capacidade de gerar ao longo de 10 anos o equivalente a 50 m<sup>3</sup> de metano (Lima, 2002). Este é um valor compatível com o adotado pela USEPA, que indica uma faixa de variação de 125 a 310 m<sup>3</sup>/tonelada de

resíduo, e adota um valor padrão de 170 m<sup>3</sup>/tonelada para os cálculos do modelo Scholl-Canyon.

Considerando que o cenário de geração no caso deste modelo é de 25 anos de operação e mais 50 anos ainda gerando gases, e o de Lima é um processo biológico acelerado com previsão de conclusão em 10 anos, o valor de 50 m<sup>3</sup>/tonelada adotado é aceitável uma vez que a extrapolação para 25 anos de operação resultaria exatamente em 125 m<sup>3</sup>/ton. No entanto ainda é considerado o período pós-fechamento, de mais 50 anos.

Desta forma aplicando-se os tempos de bioestabilização sugeridos na bibliografia citada por Lima (2002) para a meia-vida do resíduo no que se refere à sua capacidade de geração de metano, assim como o do tempo total do processo para cada parcela de resíduo (FD ou MD, já que os outros dois não tem significado para os cálculos de geração), calculam-se os valores dos fatores de produção de metano gerado no tempo considerado, para cada parcela e para cada ano do processo de biodegradação. Estes fatores são apresentados na figura seguinte.

Estes fatores de produção, calculados separadamente para as parcelas FD (degradação considerada em quatro anos) e MD (degradação em 10 anos), são então agrupados para cada ano do período considerado, e se constituirão nos fatores multiplicativos para obtenção dos valores totais de metano gerado no aterro.

Utilizando-se a mesma disposição média anual de RSU já considerada na aplicação do modelo Scholl-Canyon, isto é, 10.000 toneladas de resíduos depositadas no aterro por ano, calcula-se a geração de metano conforme apresentado na figura a seguir. Destaque-se que para cada 10.000 toneladas dispostas anualmente no aterro teremos a repetição do processo de geração, truncado-se os resultados no décimo ano para efeito comparativo com os do outro modelo.

Como pôde se observar, o total ao final de 10 anos, isto é, ao final do período, resultou em aproximadamente 3.700.000 m<sup>3</sup> de metano gerado nas mesmas condições médias de disposição de resíduos do outro caso. Este valor, comparado com o valor de 2.028.000 m<sup>3</sup>, resulta num aumento de mais de 80%.

Por esta comparação, e pelos valores encontrados e sua variação, observa-se que ambos os valores são muito imprecisos.

**Tabelas 12 - Cálculo dos fatores de produção de metano - Lima**

Composição percentual dos resíduos de Paracambi segundo o grau de biodegradabilidade								
componente	% (base úmida)	Tipo	Tempo de bioestabilização (anos)		FD - facilmente degradável	MD - moderadamente degradáveis	DD - dificilmente degradáveis	ND - não degradáveis
			T0,5 meia-vida	T1 tempo total				
Matéria orgânica putrescível	63,33	FD	2,0	4,0	63,33			
papel e papelão	13,70	MD	5,0	10,0		13,70		
plástico fino e grosso	20,30	ND						20,30
trapo, couro, borracha	0,97	DD	20,0	100,0			0,97	
vidro, terra, pedra	0,95	ND						0,95
metais ferrosos	0,75	ND						0,75
metais não ferrosos	0,00	ND						0,00
diversos	0,00	ND						0,00
	100,00				63,33	13,70	0,97	22,00

Fator de Produção de metano de cada componente ao longo do tempo do processo				
Fator Kn	Valor percentual (%)	Peso do lixo (kg)	Produção de CH <sub>4</sub> (Nm <sup>3</sup> /t)	Ano
K1 (FD)	12,5%	79,2	3,96	1
K2 (FD)	37,5%	237,5	11,87	2
K3 (FD)	37,5%	237,5	11,87	3
K4 (FD)	12,5%	79,2	3,96	4
K1 (MD)	2%	2,7	0,37	1
K2 (MD)	6%	8,2	1,10	2
K3 (MD)	10%	13,7	1,83	3
K4 (MD)	14%	19,2	2,57	4
K5 (MD)	18%	24,7	3,30	5
K6 (MD)	18%	24,7	3,30	6
K7 (MD)	14%	19,2	2,57	7
K8 (MD)	10%	13,7	1,83	8
K9 (MD)	6%	8,2	1,10	9
K10 (MD)	2%	2,7	0,37	10

**Tabela 13 – Tabela de produção total de metano - Lima**

Fator de Produção de metano do somatório dos componentes ao longo do tempo do processo, para um cenário de 10 anos																
Fator Kn	Peso de lixo (kg)	Produção anual de CH <sub>4</sub> (m <sup>3</sup> /t/ano)	Ano	Produção total de metano considerando a deposição anual de 10.000 toneladas de RSU em Paracambi, em média.												
				1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Total anual	Total acumulado	
K1	81,9	4,32	1	43.248											43.248	43.248
K2	245,7	12,97	2	129.745	43.248										172.993	216.241
K3	251,2	13,71	3	137.079	129.745	43.248									310.072	526.313
K4	98,3	6,53	4	65.250	137.079	129.745	43.248								375.322	901.635
K5	24,7	3,30	5	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248							408.325	1.309.960
K6	24,7	3,30	6	33.003	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248						441.328	1.751.288
K7	19,2	2,57	7	25.669	33.003	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248					466.997	2.218.285
K8	13,7	1,83	8	18.335	25.669	33.003	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248				485.332	2.703.617
K9	8,2	1,10	9	11.001	18.335	25.669	33.003	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248			496.333	3.199.950
K10	2,7	0,37	10	3.667	11.001	18.335	25.669	33.003	33.003	65.250	137.079	129.745	43.248		500.000	3.699.950
<b>Total</b>	<b>770,3</b>	<b>50,0</b>		<b>500.000</b>	<b>496.333</b>	<b>485.332</b>	<b>466.997</b>	<b>441.328</b>	<b>408.325</b>	<b>375.322</b>	<b>310.072</b>	<b>172.993</b>	<b>43.248</b>		<b>3.699.950</b>	

Nesta tabela estão consolidados os fatores de produção de metano considerando o somatório decorrente dos cálculos com a matéria putrescível, facilmente degradável (FD), e os materiais moderadamente degradáveis (MD).

Este somatório, aplicado aos totais de resíduos depositados por ano no aterro, e considerando um cenário de 10 anos, que é o aplicável neste modelo de biodegradação acelerada, resulta na previsão total de aproximadamente 3.700.000 m<sup>3</sup> de metano produzidos.

Modelo Lima - Geração de metano Paracambi

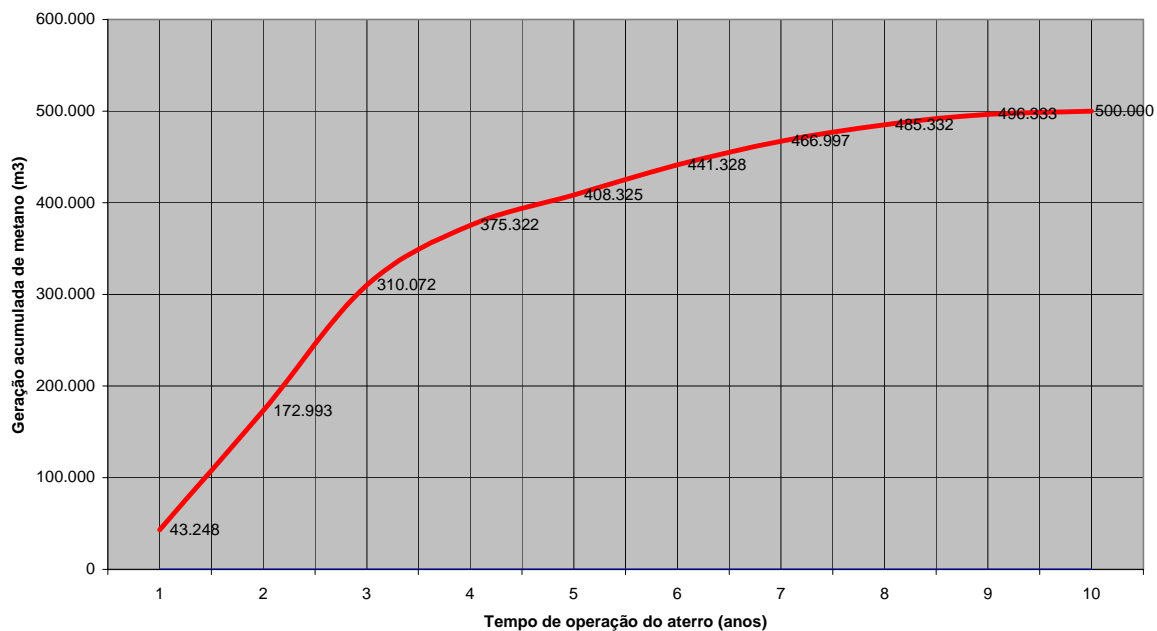


Figura 15 - Gráfico de geração anual de metano - Lima

Geração acumulada de metano - modelo Lima

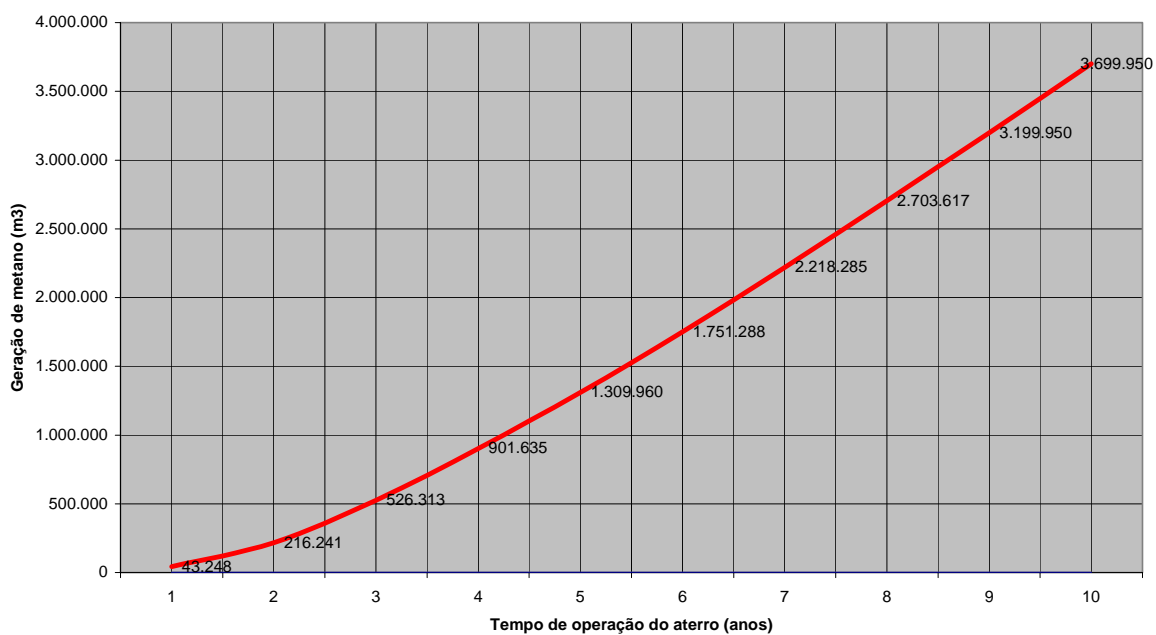


Figura 16 - Gráfico de geração acumulada de metano - Lima

#### **4.3.2.2.3 Conclusões parciais:**

Pela aplicação dos dois modelos observou-se, em termos de médias anuais de geração de metano, valores bastante diferentes, resultando por um método (Scholl-Canyon) em uma média de 27.000 m<sup>3</sup>/ano e no outro 370.000 m<sup>3</sup>/ano. Desta forma não é possível fazer considerações pela média anual. Mais significativo será a consideração dos valores globais de geração, mesmo comparando com um método simplificado e com cenário de somente 10 anos. Neste caso teremos uma diferença de aproximadamente 80% entre os dois valores totais, ou seja, resultando na estimativa de geração de metano para Paracambi em torno de 2.800.000 m<sup>3</sup> em todo o processo de degradação da massa de resíduos utilizando-se o modelo do Banco Mundial. Isto considerando-se o fechamento do aterro em 2005, isto é, o não recebimento de resíduos a partir deste ano (vigésimo-quinto ano da operação, para efeito de cálculo).

Além desses modelos analisados poder-se-ão em breve utilizar outros, tais como o desenvolvido por Cortázar (2003), objetivando-se uma estimativa cada vez mais acurada da geração de gases para aterros deste tipo, uma vez que a emissão de gases tende, além de possivelmente afetar o estado de saúde das populações vizinhas, poder ser um fator arrecadador de recursos para o município através da produção de energia e venda de créditos carbono.

A venda de créditos de carbono, assunto de interesse mundial pelo problema do aquecimento global (IPCC, 2001) é, em rápida análise, um fator de incentivo e alavancador para estudos e remediações dos problemas ambientais causados pela disposição de resíduos sólidos uma vez que isto está associado diretamente à atuação do metano como gás de efeito estufa.

## **4.4 INVESTIGAÇÃO EPIDEMIOLÓGICA**

Como dados para análise considerou-se a necessidade de estudar uma população de crianças entre 7 e 13 anos que vivesse no entorno até 500 metros do aterro, e uma população igual que vivesse, preferencialmente, distante mais de 5 quilômetros do aterro. Esta população mais distante, deveria estar fora do centro da cidade para se evitar a influência de outros efeitos tais como o tráfego urbano, pequenas indústrias, que poderiam influenciar os resultados e se tornar fatores de confusão para a análise pretendida.

Por questões logísticas, distância da cidade e do aterro em estudo, assim como a mudança administrativa ocorrida em 01 de janeiro de 2005, este levantamento de dados de campo foi prejudicado e o estudo teve de ser simplificado.

### **4.4.1 MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **O QUESTIONÁRIO UTILIZADO**

A ferramenta de pesquisa utilizada para obtenção das informações do estado de saúde das populações vizinhas ao aterro de resíduos sólidos de Paracambi, foi o mesmo questionário utilizado por Ribeiro et al. (2003), desenvolvido por Ferris (1978), para o projeto de padronização epidemiológica, da Divisão de Doenças Pulmonares do Instituto Nacional do Coração, Pulmão e do Sangue, dos Estados Unidos.

Este questionário é aplicável a crianças com menos de 13 anos, tem caráter puramente científico, sendo que todas as informações obtidas são usadas com compromisso de confidencialidade, para pesquisa somente.

O questionário é constituído de quarenta e três questões formuladas aos indivíduos da pesquisa. Cada uma das questões apresenta opções relacionadas ao tópico pesquisado, disponibilizando as alternativas compatíveis. As questões assim apresentadas são agrupadas de forma a representar aspectos da pesquisa relacionados ao estado de saúde dos indivíduos assim como a identificação do histórico familiar e a caracterização do cenário onde estão inseridas as pessoas.

Os agrupamentos existentes no questionário são constituídos por:

- I. (questões de nos. 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 e 10): Identificação do indivíduo e do cenário onde está inserido;
- II. (questão no. 11): tosse;
- III. (questões nos. 12 e 13): congestão e/ou catarro;

- IV. (questões nos. 14, 15 e 16): chiado;
- V. (questões nos. 17, 18 e 19): doenças do tórax;
- VI. (questões nos. 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28 e 29): outras doenças;
- VII. (questão no. 30): alergia;
- VIII. (questões nos. 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42 e 43): histórico familiar.

## **A APLICAÇÃO DOS QUESTIONÁRIOS**

O método de investigação utilizado foi o de um estudo Caso-Controle simplificado, ou seja, a investigação do estado de saúde da população infantil nas escolas e localização do bairro destas escolas em relação ao lixão.

O grupo sensível investigado foi o de crianças na idade de 7 a 13 anos, estudantes de escolas municipais situadas em diversos bairros do município e localizados a distâncias variadas do aterro.

A ferramenta de pesquisa utilizada foi um questionário criado pela Divisão de Doenças Pulmonares do Instituto Nacional do Coração, Pulmão e do Sangue dos EUA. (In: Ribeiro et al, 2003), sendo que o planejamento inicial previu a aplicação de 150 questionários.

A pesquisa foi aplicada a crianças no próprio ambiente escolar, no final do ano de 2004. Numa primeira etapa foi realizada em duas escolas públicas municipais. Nestas escolas, por motivos conjunturais a pesquisa abrangeu alunos de outras sete escolas, perfazendo dessa forma representantes de nove escolas. As etapas seguintes de aplicação da pesquisa, previstas para que no início de 2005 fosse atingido um total de 150 questionários aplicados, foram interrompidas por motivo político-administrativo em vista da posse do novo prefeito (01.01.2005) e da negativa do mesmo, segundo nos foi informado oficialmente por assessor direto do prefeito, em permitir a continuidade dos trabalhos, até segunda ordem. Isto provavelmente foi motivado, suposição feita uma vez que ainda não foi possível uma audiência com o prefeito, por procedimentos internos de posicionamento do novo grupo administrativo, o que é normal no início das administrações municipais. Mas de qualquer forma isto prejudicou significativamente a continuidade dos trabalhos de pesquisa envolvidos nessa dissertação.

Conforme consulta ao Instituto Nacional de Estudos e Pesquisas Educacionais Anísio Teixeira (Inep) – ([www.cadastroescolas.inep.gov.br](http://www.cadastroescolas.inep.gov.br)), o município de Paracambi possui a seguinte composição da rede escolar, totalizando 28 escolas no ensino fundamental:

- 9 escolas municipais na zona urbana;
  - CIEP Pref Nicola Salzano
  - Creche Vila São Jorge
  - Escola Allan Kardec
  - Escola Dias da Costa
  - Escola Dr. Carlos Nabuco
  - Escola Gov Roberto Silveira
  - Escola Hortência Phirro do Valle
  - Escola Prof Ayda Costa
  - Escola Prof Odete Teixeira da Silva
- 9 escolas municipais na zona rural;
  - Escola Comte Azeredo Coutinho
  - Escola da Floresta
  - Escola Mario Bello
  - Escola do Coroado
  - Escola Margarida Alves
  - Escola Ponte Coberta
  - Escola Santo Antônio
  - Escola São José
  - Escola Terra de Educar
- 6 escolas estaduais na zona urbana;
  - Colégio Pres Rodrigues Alves
  - Colégio Prof Luiza Drumond dos Reis
  - CIEP Garrincha Alegria do Povo
  - CIEP Pastor Augustinho de Souza
  - CIEP Antonio Botelho
  - Escola Boa Esperança
- 4 escolas particulares na zona urbana;
  - Colégio Cenecista Paracambi
  - Instituto Educacional Aquarela
  - Jardim de Infância Tic Tac
  - Jardim Escola Modelo

O **Cadastro de Escolas do Censo Escolar** é um banco de dados da Educação Básica que disponibiliza informações sobre as instituições rurais ou urbanas dos variados níveis e modalidades de ensino (da creche ao ensino médio), dos âmbitos

federal, estadual, municipal ou particular. É uma autarquia federal vinculada ao Ministério da Educação (MEC), cuja missão é promover estudos, pesquisas e avaliações sobre o Sistema Educacional Brasileiro com o objetivo de subsidiar a formulação e implementação de políticas públicas para a área educacional a partir de parâmetros de qualidade e equidade, bem como produzir informações claras e confiáveis aos gestores, pesquisadores, educadores e público em geral.

Portanto, em vista do acima exposto, nesta primeira e única etapa de aplicação dos questionários foram obtidas cinquenta e uma entrevistas, cujos resultados foram tabulados mantendo-se a estrutura original do questionário.

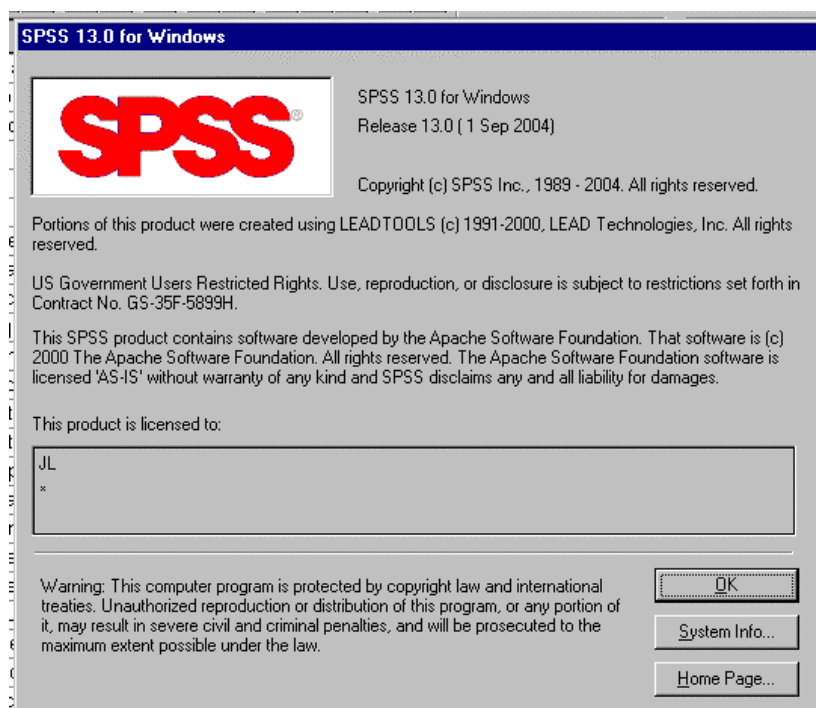
Na figura a seguir apresentada está exemplificada, um trecho da tabulação utilizada para posterior análise:

Ques tionár io núme ro	data da aplicação	1 sexo	2 cor	3 data de nasciment o	idade - cálculo automático - ANOS	idade	4 cidade natal	5A cidades com mais de 6 meses	5C Há quantos anos mora no endereço atual?	6 Série que estuda:	6 Escola que frequenta:
C01	25/02/05	F	B	09/11/93	11,5	11	Paracambi		11	5	Hortência
C02	25/02/05	F	N	10/08/92	12,8	12	Paracambi	SR	SR	5	Hortência
C03	25/02/05	F	B	10/01/93	12,4	12	SR		12	5	Hortência
C04	25/02/05	M	P	12/02/94	11,3	11	Paracambi	SR	SR	5	Hortência
C05	25/02/05	M	P	08/03/90	15,2	14	Paracambi	SR	5	5	Hortência
C06	25/02/05	F	P	22/07/94	10,8	10	Paracambi	SR	1	5	Hortência
C07	25/02/05	F	B	25/03/94	11,2	10	Paracambi	SR	4	5	Hortência
C08	25/02/05	M	P	03/01/95	10,4	10	Paracambi	SR	10	5	Hortência
C09	25/02/05	F	P	09/02/94	11,3	11	Paracambi	SR	6 meses	5	Hortência
C10	25/02/05	F	B	22/08/93	11,7	11	Paracambi	SR	11	5	Hortência
C11	25/02/05	M	B	21/11/93	11,5	11	Paracambi	SR	anos	5	Hortência
C12	25/02/05	F	B	29/05/93	12,0	11	Paracambi		5 anos	5	Hortência
C13	25/02/05	F	P	29/12/93	11,4	11	Paracambi	SR	6 anos	5	Hortência
C14	25/02/05	M	N	26/01/94	11,3	11	Vassouras		12?	5	Hortência
C15	25/02/05	F	N	22/12/94	10,4	11	Japeri	1	5 ??	5	Hortência
C16	25/02/05	M	P	19/05/92	13,0	12	Vassouras		2 anos	5	Hortência

**Figura 17 - exemplo da tabulação de resultados da pesquisa**

#### 4.4.2 RESULTADOS

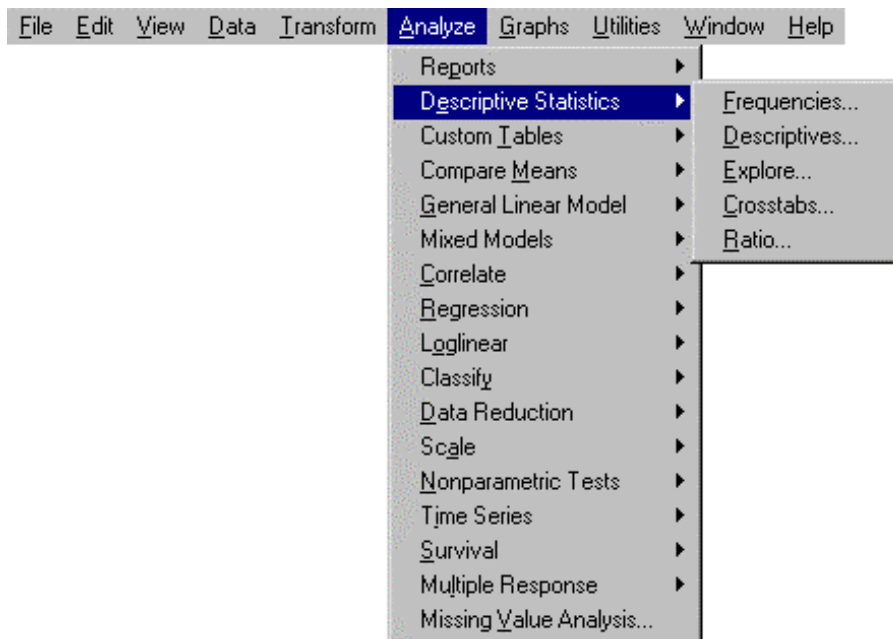
Os resultados da primeira etapa de pesquisa foram então tabulados numa matriz específica no programa estatístico SPSS 13.0 for Windows (Lead Technologies, 2004), que serviu de base para a extração dos resultados para a análise.



**Figura 18 - programa estatístico utilizado para análise**

O SPSS é utilizado como uma importante ferramenta para ajudar a analisar os dados obtidos, pois fornece um aprofundamento estatístico necessário para resolver vários problemas, tanto de negócios como de pesquisas. Fornece uma ampla gama de análises estatísticas, de modo que possa se obter a resposta mais precisa para os tipos de dados específicos disponíveis.

Na figura a seguir é apresentada uma tela do menu do programa SPSS com as ferramentas de análise estatística disponíveis.



**Figura 19 - menu de ferramentas de análise do SPSS**

Para que fosse possível a aplicação do programa, ao estudo de caso de Paracambi, foi realizada a montagem de uma matriz, através do próprio programa, de modo que contivesse as informações a serem trabalhadas. Na montagem dessa matriz foi obedecida toda a estrutura original do questionário, inclusive mantendo-se questões separadas para cada opção existente em cada pergunta.

Iniciou-se a fase de análise dos dados da forma convencional, isto é, através da descrição das variáveis observadas, calculando-se as medidas de tendência central, variabilidade, assimetria e curtose. O objetivo desta primeira análise foi o de identificar indivíduos com pontuações extremas ou situadas fora do âmbito da variável, de modo a possibilitar as correções necessárias, num processo chamado de depuração de dados.

A seguir, como o objetivo principal da pesquisa era identificar e examinar os possíveis impactos no estado da saúde das populações vizinhas a aterros de resíduos sólidos, optou-se pelo uso da Análise Fatorial, na tentativa de se buscar uma comprovação para a hipótese estabelecida.

A opção por uma técnica multivariada, como é o caso da análise fatorial, obedece à premissa de interdependência que existe entre as variáveis, identificada através da análise das associações lineares existentes. Assim, observando-se o comportamento das variáveis no que se refere ao grau de relacionamento existente entre elas é possível simplificar o conjunto original das variáveis estudadas, pelo processo de redução da dimensionalidade.

Uma vez montada a matriz principal foram extraídos resultados por análise fatorial. Esse processamento dá-se através da opção “análise” do menu principal, opção “redução de dados”, opção “fatores”. Com o processamento do programa foram obtidos os coeficientes de correlação entre as variáveis para todo o conjunto estudado.

## A ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os coeficientes de correlação obtidos demonstraram que não foram encontrados resultados que expressassem correlação significativa entre as variáveis utilizadas nos questionários aplicados. Em relação ao universo aplicado somente um pequeno percentual apresentava coeficientes acima de 0,70. Além disso, as poucas correlações encontradas não indicavam resultado significativo interessante para o estudo em questão, no qual se objetivou analisar a exposição de pessoas a uma área de influência de sítio de disposição de resíduos sólidos urbanos.

Desta forma, abandonou-se a tentativa de se analisar os dados através da análise fatorial optando-se por extrair novos resultados, através da análise dos dados segundo tabulações cruzadas. Com estas tabulações é possível calcular os percentuais de incidência de cada variável, do conjunto em estudo, relativamente à uma variável selecionada, escolhida como referência básica. Esta tabulação foi obtida para somente uma variável de referência de interesse específico do estudo, que foi a de posicionamento geográfico da população em relação ao aterro de resíduos.

A seguir, foram então tabuladas as incidências percentuais de todas as variáveis em relação à variável “bairro onde está localizada a escola”.

<b>(6A) Escola que frequenta:</b>					
		Frequency	Percent	Valid Percent	Cumulative Percent
Valid	Antonio Botelho	2	3,9	3,9	3,9
	Augustinho Souza	1	2,0	2,0	5,9
	Nicola Salzano	10	19,6	19,6	25,5
	Colegio Cenecista	1	2,0	2,0	27,5
	Roberto Silveira	1	2,0	2,0	29,4
	Hortência do Valle	32	62,7	62,7	92,2
	Odete Teixeira	1	2,0	2,0	94,1
	Instituto Aquarela	2	3,9	3,9	98,0
	Escola Modelo	1	2,0	2,0	100,0
	Total	51	100,0	100,0	

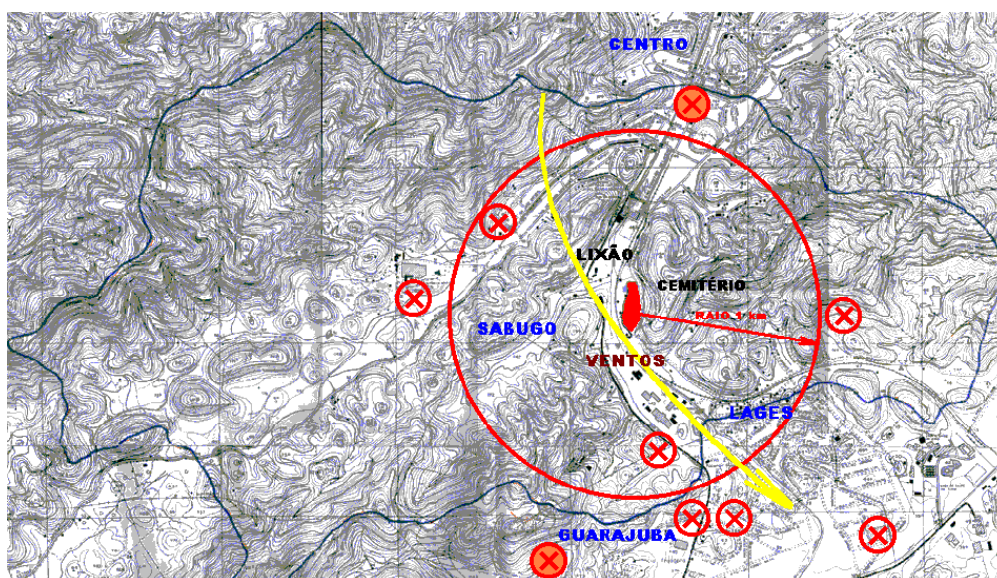
<b>(6B) Bairro onde está localizada a escola</b>					
		Frequency	Percent	Valid Percent	Percent
Valid	Centro	9	17,6	17,6	17,6
	Guarajuba	32	62,7	62,7	80,4
	Lages	5	9,8	9,8	90,2
	BNH	1	2,0	2,0	92,2
	Amapá	4	7,8	7,8	100,0
	Total	51	100,0	100,0	

**Figura 20 - resultados da análise relativos à variável "bairro"**

Como as variáveis estão agrupadas conforme anteriormente definido, isto é, em oito grupamentos de interesse da pesquisa, foram analisados e destacados os percentuais significativos para o estudo, caso a caso, a seguir apresentados.

Com relação aos resultados obtidos observou-se que, no agrupamento “identificação geral”, destacam-se os seguintes aspectos:

- As escolas mais representadas na pesquisa foram a Hortência do Valle e a Nicola Salzano, com um percentual total de 76% dos alunos pesquisados. Dessa forma o bairro mais representado foi o de Guarajuba, localizado a aproximadamente 1.500 metros do sitio de resíduos, responsável por 63% do total até então pesquisado.



**Figura 21 - Localização dos principais bairros da pesquisa**

- O perfil representativo das crianças pesquisadas mostra que:
  - estão bem distribuídas entre o sexo feminino (51%) e masculino (49%) ;
  - 65% estão na faixa etária entre 10 e 12 anos;

- 57% estão na 5<sup>a</sup>. série escolar;
  - predominam as crianças das cores negra e parda com total de 65%;
  - a cidade natal de 83% é Paracambi;
  - 20% moram no mesmo endereço a aproximadamente 5 anos.
- Quanto aos aspectos relativos à sua residência, naquilo que interessa diretamente à pesquisa, destaca-se:
- que a maioria das crianças dorme com no máximo mais uma pessoa no quarto (68,7) e, dessas, a maioria dorme sozinha na cama (86,3) ;
  - não têm a presença de fumantes na residência (86%);
  - as residências possuem de 3 a 5 cômodos (74,5);
  - de 3 a 5 pessoas moram no mesmo local (74,2);
  - os fogões de cozinha são alimentados por gás de bujão (98%);
  - quanto à presença de animais registrou-se que 49% não possui nenhum tipo de animal em casa e 27% possui somente cães, sendo o restante de pássaros, gatos, e combinações dos três tipos.
- No que se refere aos agrupamentos que representam investigação do estado de saúde dos indivíduos destacam-se:
- **Tosse:** o aspecto se apresenta interessante para a pesquisa considerando a incidência de crianças que apresentam tosse sem estarem resfriadas (45%). Com exceção do bairro Centro onde predomina tosse somente quando resfriadas, todos os outros quatro bairros apresentam percentuais significativos de tosse sem as crianças estarem resfriadas. No entanto não é uma tosse do tipo de tempo inteiro segundo os entrevistados;
  - **Congestão ou/e catarro:** Dentro da normalidade. Somente um pequeno percentual de aproximadamente 3% apresenta congestionamento e catarro na maior parte dos dias. Não há predominância de nenhum bairro. No entanto, sem predominância de bairro, 30% informou que tem ataques crescentes de tosse, peito congestionado ou catarro, durando por uma semana ou mais a cada ano;
  - **Chiado:** Aproximadamente 20% dos entrevistados informou que, mesmo fora dos resfriados comuns, o peito chia ou assobia. Esse percentual se mantém indicando ataques de chiado com

falta de ar, mas somente 2% relatou ter tido dois ou mais destes episódios e necessitando tomar remédios ou fazer tratamento para este tipo de ataque. No entanto 31% informou ter ataques de chiado após brincar muito ou fazer exercícios;

- **Doenças do tórax:** Os resultados indicam baixa incidência de doenças desse tipo;
- **Outras doenças:** Os resultados indicam um quadro normal, predominando os casos de sarampo, bronquite, pneumonia e tosse comprida, infecções de ouvido, mas com índices baixos, não havendo destaques preocupantes, percentualmente;
- **Alergia:** Destaque-se uma tendência a reações alérgicas a pólen ou poeiras, com 41,2% dos entrevistados, mas sem predomínio em nenhum dos bairros analisados;
- **História familiar:** O perfil predominante é que os responsáveis pela família são o pai (73%) e a mãe (90%), e que ambos têm o primeiro grau escolar. Predomina que ele atua na construção civil e ela é dona-de-casa. Não fumam e o quadro de incidência de doenças respiratórias é normal, sem destaques por tipo ou por bairro analisado.

## CONCLUSÕES PARCIAIS

Pela análise realizada concluiu-se pela normalidade do quadro encontrado, não havendo destaque significativo de nenhum tipo de doença, principalmente daqueles relativos à emissão de poeiras e gases provenientes do aterro de resíduos sólidos.

Com exceção de uma pequena tendência de crianças apresentarem sintomas de tosse sem estarem resfriadas, assim como sintomas alérgicos a poeiras, não foi identificada uma região que apresentasse predomínio no conjunto.

Quanto aos agrupamentos que representam o estado de saúde dos indivíduos pesquisados destacam-se:

- Tosse: 45% das crianças apresentam tosse sem estarem resfriadas Com exceção do bairro Centro, onde predomina tosse somente quando resfriadas, em todos os outros quatro bairros as crianças apresentam percentuais significativos de tosse sem estarem resfriadas. No entanto, não é uma tosse do tipo de tempo inteiro;

- Congestão ou/e catarro: Dentro da normalidade. Somente cerca de 3% apresenta congestionamento e catarro na maior parte dos dias. Não há predominância de nenhum bairro. No entanto, sem predominância de bairro, 30% informou que tem ataques crescentes de tosse, peito congestionado ou catarro, durando por uma semana ou mais a cada ano;

Chiado: Aproximadamente 20% dos entrevistados informou que, mesmo fora dos resfriados comuns, o peito chia ou assobia. Cerca de 31% informou ter ataques de chiado após brincar muito ou fazer exercícios;

- Doenças do tórax: Os resultados indicam baixa incidência de doenças desse tipo;

- Outras doenças: Os resultados indicam um quadro normal, predominando os casos de sarampo, bronquite, pneumonia e tosse comprida, infecções de ouvido, mas com índices baixos, não havendo destaques preocupantes, percentualmente;

- Alergia: Destaque-se uma tendência a reações alérgicas a pólen ou poeiras, com 41,2% dos entrevistados, mas sem predomínio em nenhum dos bairros analisados.

## 5 CONCLUSÕES

### 5.1.1 ATUAÇÃO DA COBERTURA DOS ATERROS

Constatou-se ao longo das pesquisas de campo desse estudo que o solo encontrado na cobertura não foi adequadamente preparado para sua colocação como material de cobertura e proteção de um aterro de resíduos sólidos, existindo somente uma mistura do mesmo com lixo. Suas características predominantes, que são de um silte argiloso contendo areia, são adequadas para uso como material de cobertura desde que corretamente preparado, disposto e compactado o que, como já foi dito, não foi o encontrado nesse estudo de caso.

Em vista das características desta camada de solo de cobertura do local, muito misturada com resíduos e com espessura muito variável, sem caracterização do seu início e fim, não foram encontradas condições de campo suficientes para, nessa primeira pesquisa, realizar todas as medições de fluxo de gases através da camada conforme planejado. Para que isto fosse possível seria necessária a identificação de uma linha base da camada em estudo para analisar as condições de entrada e saída dos gases migrando através dela, o que se mostrou impraticável.

Também no caso de Paracambi, considerando essas características gerais de disposição inadequada sem a montagem de células de resíduos, resulta que os taludes do aterro ficam a descoberto e, por ali, através de processo advectivo-difusivo, tende a predominar a emissão de gases desse aterro. É muito importante para efeito de quantificação e análise das emissões totais que se considerem os estudos atuais sobre predominâncias dos fluxos de gases nos aterros de lixo pelas suas laterais e linhas de contorno, conforme estudos de Börjesson et al. (1997), Haarstad (1997), Barry et al. (2003), Scheutz et al. (2001), e outros.

A continuidade desses estudos permitirá melhor avaliar as emissões e sua atenuação, assim como, e principalmente, a atuação oxidante dessa camada de solo de cobertura do metano produzido nos aterros, o que ficou nesse trabalho de pesquisa prejudicado pelas condições encontradas no estudo de caso.

### 5.1.2 ASPECTOS EPIDEMIOLÓGICOS

Dentro das hipóteses formuladas, e especificamente a de examinar os impactos potenciais no estado da saúde das populações vizinhas a aterros de resíduos sólidos, concluiu-se pela não existência de evidências que confirmem esta hipótese.

Desta forma, e considerando-se os limites que existiram à aplicação do estudo de caso apresentado, conclui-se pela necessidade de um maior aprofundamento na pesquisa, realizando-se um maior número de entrevistas e obtendo uma representatividade maior dos resultados.

Constatou-se que a linha de pesquisa utilizada se mostrou prática em vista da utilização do ambiente escolar como meio de obter informações do estado de saúde da região, uma vez que ali são encontrados representantes da faixa mais sensível dessa população. Para isto foi considerado o fato de que no processo de aceitação de matrículas no ensino fundamental está vinculado à proximidade da residência do aluno à escola pretendida. No entanto, considerando que a questão principal se refere à localização geográfica da população em relação ao aterro de resíduos sólidos, é muito importante que a aplicação dos questionários seja, sempre que possível, de caráter domiciliar. Dessa forma, com a perfeita identificação da residência do entrevistado e de sua localização em relação ao aterro, será possível uma análise mais significativa do caso-controle investigado, considerando-se a importância da pesquisa científica e dos seus resultados relacionados à exposição a resíduos.

Destaque-se também o fato de que a pesquisa, através da aplicação dos questionários, ficou parcialmente prejudicada em vista de que não foi permitida a aplicação do total inicialmente previsto a tempo de serem incluídos nas análises realizadas. No entanto, em vista de que nenhuma evidência significativa foi identificada no que foi analisado, foram considerados representativos os resultados para efeito deste estudo.

Novas análises deverão ser realizadas, principalmente com as recomendações aqui registradas. No entanto destaque-se que, embora não tenham sido evidenciados problemas de saúde na população com a amostragem realizada, observou-se nos índices disponibilizados pelo IBGE (2004a), especificamente no que se refere à análise de “óbitos por doenças no aparelho respiratório em 2003”, a evidência, e de forma bastante precisa, que o índice de Paracambi foi mais do que o triplo da média encontrada dos municípios vizinhos e outros considerados do mesmo porte do estado do Rio de Janeiro. Considerando-se a abrangência e representatividade das pesquisas do IBGE, este é um dado que deverá ser levado em conta na continuação das pesquisas no município.

### 5.1.3 RISCO AMBIENTAL

Esta avaliação usaria dados geotécnicos da cobertura, dados do lixiviado (Schueler, 2005), dados da geração de gases e dados de observações epidemiológicas. Tendo em vista que a cobertura foi executada de forma bastante limitada tecnicamente, e o estudo epidemiológico restringiu-se, por razões políticas na troca de governo a um número relativamente pequeno de informações, os procedimentos para avaliação de risco foram detalhados nesse trabalho mas a avaliação não foi feita tendo em vista a pouca representatividade dos parâmetros disponíveis para esse tipo de análise.

Os resultados observados nas conclusões relativas aos solos e à saúde da população vizinha ao aterro resultaram em tantas lacunas que concluiu-se não dispor ainda de elementos para análise de risco ambiental adequada

Considerando a importância da quantificação dos riscos a que estão expostas as populações que sofrem a influência das áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos, é muito importante que uma melhor caracterização e quantificação seja realizada para então ser utilizada uma metodologia de análise e avaliação de riscos adequada. Uma identificação completa, tanto da fonte que se constitui o aterro, quanto dos receptores, a população, e do diagnóstico do seu estado de saúde, permitirá conclusões que servirão de base para novas políticas públicas da região assim como o aprimoramento da legislação ambiental brasileira, como instrumento para a avaliação e remediação de locais contaminados.

As dificuldades encontradas no estudo de caso de Paracambi, tanto de aplicação da pesquisa aplicada à população infantil, como as relativas à operação do aterro de lixo, simplesmente confirmam a complexidade do assunto e a importância da continuidade desses estudos, principalmente com o objetivo de hierarquizar as medidas preventivas e corretivas por parte dos órgãos públicos responsáveis.

#### 5.1.4 RECOMENDAÇÕES PARA NOVOS ESTUDOS

- 1) Realizar uma campanha de medidas de gases ao longo de um ano, no mínimo, no aterro, confrontando as medições com dados meteorológicos;
- 2) Aprofundar os estudos de saúde pública, aplicando de uma maneira mais abrangente utilizando a metodologia empregada nessa dissertação;
- 3) Realizar uma melhor análise do material usado para a cobertura do aterro, analisando o seu comportamento quanto a aspectos de produção de gases e chorume;
- 4) Realizar mais coletas de solos visando obter curvas características do solo de base e cobertura, permitindo uma posterior determinação do balanço hídrico e estudos relativos a estes aspectos com destaque para os modelos propostos por Schueler (2005); Instrumentar e realizar captação de poeiras nas residências das populações vizinhas ao aterro, objetivando qualificar e quantificar aquelas geradas na sua superfície, incluindo-se a identificação de microorganismos carregados nas pequenas partículas;
- 6) Instrumentar melhor o entorno do aterro procurando observar também o efeito dos lixiviados produzidos pelo cemitério localizado a aproximadamente 50 metros acima da cota do aterro de Paracambi;
- 7) Realizar o recobrimento do aterro com vegetação semelhante à usada por Andrade (2000) objetivando a transformação a médio prazo da área em parque público, assim como estudar o comportamento da geração de gases, de chorume, e da saúde da população.
- 8) Deverão ser tomadas providências especiais para a manutenção de estações de medições de gases em aterros desse tipo e com operação não controlada, em vista da sua destruição durante as pesquisas, tanto por equipamentos quanto por pessoas;
- 9) A continuidade desses estudos, em melhores condições operacionais, permitirá melhor avaliar as indicações de fluxo lateral predominante assim como, e principalmente, a atuação oxidante dessa camada de solo de cobertura do metano produzido nos aterros, o que ficou nesse trabalho de pesquisa prejudicado pelas condições encontradas no estudo de caso.

## 6 BIBLIOGRAFIA

- ABNT, 1984, Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos – NBR-8419 - Procedimento. Rio de Janeiro.).
- ABNT, 1997, Aterros de resíduos não-perigosos – Critérios para projetos, implantação e operação – NBR-13896 - Procedimento. Rio de Janeiro.
- AGUIAR, A.B., 2001, O Emprego do Permeâmetro de Guelph na Determinação da Permeabilidade do Solo, de Camadas de Lixo e Sua Cobertura. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ALMEIDA, MÁRCIO S.S., 2002, Notas de aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ; Brasil.
- ANDRADE, J.C.M., 2000, Vegetação em Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos: Estudo de caso no Aterro Santo Amaro, São Paulo. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ANDRADE, S.M.M., 2004, Metodologia para Avaliação de Impacto Ambiental Sonoro da Construção Civil no Meio Urbano. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ARMSTRONG, M. D. & ROWE, R. K., 1999, “Effect os landfill operations the quality of municipal solid waste leachate”. In: Proceedings of International Waste Management and Landfill Symposium - Sardinia 1999. Sardinia, Italy, pp. 81-88.
- BAPTISTA, F. R. M., 2001, Caracterização física e comercial do lixo urbano de Vitória, em função da classe social da população geradora. Dissertação de M. Sc., Programa de Engenharia Ambiental/UFES, Vitória, ES.
- BARBOSA, M. C., 1994, Investigação geoambiental do depósito de argila sob o aterro de Gramacho. Tese de D. Sc., Programa de Engenharia Civil/COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ.
- BARBOSA, M.C., ALMEIDA M.S.S., 2001, “Dredging and disposal of fine sediments in the state of Rio de Janeiro”, Journal of Hazardous Materials, Brasil.
- BARBOSA, MARIA CLÁUDIA, 2001, Notas de aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ; Brasil.
- BARRY, D.L., SMITH, R., GREGORY, R.G., HARRIES, C., 2003, “Methane Production, Emission and Control During MSW Landfilling”, In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- BARRY, D.L., SMITH, R., GREGORY, R.G., HARRIES, C., 2003, “Methane Production, Emission and Control During MSW Landfilling”, In: Proceedings of the Ninth

- International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- BERNARDES JR., C., 1995, Avaliação de Risco de Longo Prazo em Casos de Contaminação de Águas Subterrâneas, como Instrumento de Gerenciamento da Remediação. Tese de Doutorado, USP/Instituto de Geociências, São Paulo, SP, Brasil.
- BÖRJESSION, G., SVENSSON B.H., 1993, "Interactions between methane oxidation and the formation of N<sub>2</sub>O in a landfill cover soils". In: Proceedings of the International Landfill Symposium - Sardinia 1993, volume I, pp. 729-733, Italy.
- BÖRJESSION, G., SVENSSON B.H., 1997, "Measurements of Landfills Gaseous Emissions and Investigations on Methane Oxidation in the Cover Soils". In: Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium - Sardinia 1997, volume I, pp. 45-52, S. Margherita di Pula, Italy.
- BOWLY, S.W., 2003, "An Assessment of Current Methods for Quantifying Landfill Odours", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- BRASIL, 2004, Ministério da Saúde. Organização Pan-Americana da Saúde., 2004, Avaliação de Impacto na Saúde das Ações de Saneamento: Marco Conceitual e Estratégia Metodológica. 1ª ed., Organização Pan-Americana da Saúde, Brasília, DF, Brasil.
- CAMPELLO, E. F. C., 1996, "O papel das leguminosas arbóreas noduladas e micorrizadas na recuperação de áreas degradadas (parte 1)". In: III Curso de Atualização em Recuperação de Áreas Degradadas, pp. 09-17, UFPR/FUPEF Curitiba, PR, Brasil.
- CAMPOS, J.D., 2001, Cobrança pelo Uso da Água nas Transposições da Bacia do Rio Paraíba do Sul Envolvendo o Setor Elétrico. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CAPELLETI, D., TENTONI, P., TAMBURINI, R., 2003, "Field Investigation on Biogas Emissions Out of Landfill Surface", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- CASAGRANDE, A. & FADUN, R. E., 1944, "Application of soil mechanics in designing building foundations". ASCE, v. 109.
- CETESB, 1993, Resíduos Sólidos Industriais. 2 ed., São Paulo, SP, Brasil, CETESB.
- CETESB, 2002, Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos: Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa. Relatórios de Referência, Ministério da Ciência e Tecnologia, Brasília, DF, Brasil.

- CHRISTENSEN, T. H., KJELDTSEN, P., 1989, "Basic biochemical processes in landfills – sanitary landfilling: process, technology and environmental impact" Editores: T. H. Christensen, R. Cossu e R. Stegman.
- CIDE, 2004, Centro de Informações e Dados do Rio de Janeiro, disponível em: <http://www.cide.rj.gov.br> Acesso em 29/12/2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- CORTÁZAR, A.L.G., 2003, Desarrollo de MODUELO 2: herramienta para la evaluación de la contaminación producida en vertederos de residuos sólidos urbanos. Tesis Doctoral, Universidade de Cantabria, Santander, Spain.
- CORVALÁN, C., 2004, Procesos de Toma de Decisiones en Salud Ambiental. Dpto of Protection of the Human Environment, WHO, Geneve. [www.who.int/phe](http://www.who.int/phe)
- CORVALÁN, C., BRIGGS, D., ZIELHUIS, G., 2000, Decision-Making in Environmental Health. 1 ed., New York, NY, E & FN Spon.
- COSSU, R., et al., 1997, "Biogas emissions measurement using static and dynamic flux chambers and infrared method"., In: Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium - Sardinia 1997, volume I, pp. 104-114, S. Margherita di Pula, Italy.
- DE LAMARE NETO, A., 2004, Resistência ao Cisalhamento de Resíduos Sólidos Urbanos e de Materiais Granulares. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- DOLK, H., VRIJHEID, M., ARMSTRONG, B., et al., 1998, "Risk of Congenital Anomalies Near Hazardous-Waste Landfill Sites in Europe: The EUROHAZCON Study", The Lancet, v. 352, pp. 423-427.
- EHRlich, M., ALMEIDA, M. S. S. & BARBOSA, M. C., 1994, "Pollution control of Gramacho municipal landfill". In: Proceedings of the 1<sup>st</sup> International Congress on Environmental Geotechnics, Edmonton, Canada, pp. 657-663.
- EHRlich, MAURÍCIO, 2002, Notas de aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ; Brasil.
- EPA, 1996, – United States Environmental Protection Agency, Turning a Liability into an Asset: A Landfill Gas-to-Energy Project Development Handbook. EPA 430-B-96-0004, U.S. EPA, Landfill Methane Outreach Program, Washington, DC, USA, September.
- FARIA, F.S., 2002, Índice da Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- FARQUAR, G.J., ROVERS, F.A., 1973, "Gas Production During Refuse Decomposition". Water, Air and Soil Poll. Vol. 2 – nº 4, pp. 483-495.
- FÉCIL, B., HÉROUX, M., GUY, C., 2003, "Development of a Method for the Measurement of Net Methane Emissions from MSW Landfills", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy,.

- FERRIS, B.G., 1978, apud RIBEIRO, H., CARDOSO, M.R.A., 2003, "Air Pollution and Children's Health in São Paulo (1986-1998)", Social Science & Medicine, v. 57, pp. 2013-2022.
- GOMIDE, R., 1993, Fluidos na Indústria. 1 ed., São Paulo, SP, Brasil, ed do autor.
- GRANTHAM G., et al., 1997, "Landfill Contribution to "Greenhouse Gas" Emission", In: Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium - Sardinia 1997, volume I, pp. 17-32, S. Margherita di Pula, Italy.
- GUIMARÃES, C.H.D., 2003, Avaliação de Risco Ambiental de Sítios Contaminados por Hidrocarbonetos de Petróleo. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- HAARSTAD K., 1997, "Methane in Landfills: Production, Oxidation and Emissions", In: Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium - Sardinia 1997, volume I, pp. 33-44, S. Margherita di Pula, Italy.
- IBAM, 2001, Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. 15 ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2002, Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - 2000, disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 07/2004, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2003, Perfil dos Municípios Brasileiros – Gestão Pública - 2001, disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 03/2004, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2004a, Cidades@ - (O Brasil município por município), disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 29/12/2004. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2004b, Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Brasil 2004 – Dimensão Ambiental - Saneamento, disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 05/2005, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2004c, Indicadores de Desenvolvimento Sustentável – Brasil 2004 – Dimensão Social - Saúde, disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 05/2005, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- IBGE, 2005, Perfil dos Municípios Brasileiros – Meio Ambiente - 2002, disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 05/2005, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- ICLEI, 2005, – Local Governments for Sustainability, Mudanças Climáticas e Desenvolvimento Limpo: Oportunidades para Governos Locais. 1 ed., Rio de Janeiro, RJ, Brasil, ICLEI/LACS.
- IPCC, 2001, Greenhouse Gas Inventory Reporting Instructions – IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Intergovernmental Panel on Climate Change, United Nations Environmental Program, the Organization for Economic Cooperation and Development and the International Energy Agency, London.3 v.;

- IPT/CEMPRE, 2000, Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado, 2 ed., São Paulo, SP, Brasil, IPT/CEMPRE.
- LAGREGA, M.D., BUCKINGHAM, P.L., EVANS, J.C., 1994, Hazardous Waste Management. 1 ed., New York, NY, USA, McGraw-Hill, Inc..
- LAMBE, T. W. & WHITMAN, R. V., 1970, "Soil mechanics". John Wiley & Sons; New York.
- LAMBOLEZ-MICHEL, L., GISBERT, T., BILLARD, H., MIRALVES, J., 2003, "Analysis of Atmospheric Pollutants from Two Municipal Solid Waste Landfills: Determination of Exposure Levels and Research of Possible Effects on Human's Health", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- LEAD TECHNOLOGIES, INC., 2004, SPSS 13.0 for Windows, Release 13.0 (1 sep 2004), versão de avaliação.
- LIMA, L.M.Q., 2002, Biorremediação de Lixões. 1 ed., São Paulo, SP, Brasil, ed do autor.
- LOLOS, G., TSOMBANIDIS, C, LOLOS, T. A. & PASCHALI, K., 2001, "A new approach to multi-criteria decision making for the land fill site selection." In: Proceedings, Sardinia, 8<sup>th</sup> International Landfill Symposium, Italy, v. IV, pp. 14-15.
- MACIEL, F.J., 2003, Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/PE. Tese de Mestrado, UFPE, Recife, PE, Brasil.
- MAHLER, C. F. & OLIVEIRA, F. J. P., 1997, "Proposta de monitoramento ambiental para operação de aterros sanitários". In: I Congreso paraguayo de ingeniería geotécnica, Assunción, Paraguay, pp. 453-465.
- MAHLER, C.F., 2003, Projeto do Centro de Tratamento de Resíduos Sólidos – CTRS – Paracambi/RJ. Prefeitura Municipal de Paracambi - Relatórios Fundação Coppetec, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAHLER, C.F., AGUIAR, A.B., 2003, "Determinação da Permeabilidade In Situ em Aterros de Resíduos Sólidos", In: Anais do XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- MAHLER, C.F., FERREIRA, M.A., FILHO, L.F.B., 2005, Estudos de Geração e Medição de Gases de Aterros de Lixo. Relatórios Fundação Coppetec, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MAHLER, CLÁUDIO F., 2002, Notas de aula, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ; Brasil.
- MAHLER. C. F. & LEITE, L. E. H. B. C., 1998, "Metodologia de seleção de áreas para implantação de aterros sanitários". Revista de Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol. 3 – nº 3 – jul./set. e nº4 out./dez., pp. 155-160.

- MCIDADES/SNIU, 2005, Sistema Nacional de Indicadores Urbanos da SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Programa para acesso do banco de dados de informações sobre Indicadores Urbanos de todos os municípios brasileiros, disponível em: <http://www.cidades.gov.br>, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Acesso em 05/2005, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MCIDADES/SNSA, 2005, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento da SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental. Programa para acesso do banco de dados de informações sobre saneamento, disponível em: <http://www.cidades.gov.br>, Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental, Acesso em 05/2005, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MESQUITA, A.C., 2004, Uso das Técnicas de Oxidação Química e Biodegradação na Remoção de Alguns Compostos Orgânicos Recalcitrantes. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- MIRANDA NETO, M.I., 2002, Investigação Geoambiental em Área de Mangue na Baía de Guanabara Contaminada com Resíduos Industriais. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, C.L., MUSQUIM, V.S., 2002, Aspectos da Política Municipal de Resíduos Sólidos do Município de Paracambi – RJ. Projeto final de curso, NADC/NASA/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- OLIVEIRA, L.B., 2000, Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos e Abatimento de Emissões de Gases do Efeito Estufa. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PHILIPPI JR., A., 1999, “Agenda 21 e Resíduos Sólidos”. In: IPT/CEMPRE, Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2 ed., São Paulo, SP, Brasil, IPT/CEMPRE, 2000.
- PHILIPPI JR., A., 2005, Saneamento, Saúde e Ambiente: Fundamentos para um Desenvolvimento Sustentável. 1 ed., Barueri, SP, Brasil, Editora Manole.
- PIMENTEIRA, C.A.P., 2002, Aspectos Sócio-Econômicos da Gestão de Resíduos Sólidos no Rio de Janeiro – Uma Análise Insumo Produto. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- PINTO, C.S., 2000, Curso Básico de Mecânica dos Solos. 1 ed., São Paulo, SP, Brasil, Oficina de Textos.
- PIVATO, A., 2003, “An Overview of the Fundamentals of Risk Assessment Applied to the Aftercare Landfill Impact”, In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.

- QIAN, X., KOERNER, R.M., GRAY, D.H., 2002, Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction. 1 ed., Upper Saddle River, New Jersey, USA, Prentice-Hall, Inc.
- REAL, M.V., 2000, A Informação como Fator de Controle de Riscos no Transporte Rodoviário de Produtos Perigosos. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- REES, J.F., 1980, "Optimization of Methane Production and Refuse Decomposition in Landfills by Temperature Control". J. Chemical Tech. Biotechnology. Vol. 30, pp. 458-465.
- REINHART, D.R., TOWNSEND, T., McCREANOR, P., 2003, "Instrumentation for in Situ Monitoring of Municipal Solid Waste Landfill Processes", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- RIBEIRO SOBRAL, H., 1988, Poluição do Ar e Doenças Respiratórias em Crianças da Grande São Paulo: um Estudo de Geografia Médica. Tese de D.Sc., Departamento de Geografia. F.F.L.C.H., Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- RIBEIRO, H., ASSUNÇÃO, J.V. de, PESQUERO, C.R., MALHEIROS, T.F., 2004, Gestão do Ar nas Cidades. 1 ed., São Paulo, SP, Brasil, Faculdade de Saúde Pública da USP, Dpto de Saúde Ambiental, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.
- RIBEIRO, H., CARDOSO, M.R.A., 2003, "Air Pollution and Children's Health in São Paulo (1986-1998)", Social Science & Medicine, v. 57, pp. 2013-2022.
- ROBINSON, A., SEWELL, G., DAMODARAN, N., et al., 2003, "Landfills in Developing Countries and Global Warming", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- SÁNCHEZ, L.E., 2001, Desengenharia: O Passivo Ambiental na Desativação de Empreendimentos Industriais. 1 ed., São Paulo, SP, Brasil, Edusp – Editora da Universidade de São Paulo.
- SAVANNE D., et al., 1997, "Comparison of Different Methods for Measuring Landfill Methane Emissions", In: Proceedings of the Sixth International Landfill Symposium - Sardinia 1997, volume I, pp. 81-85, S. Margherita di Pula, Italy.
- SCHEUTZ, C., KJELDSSEN, P., 2001, "Methane Oxidation and Biodegradation of Halogenated Organic Compounds in Landfill Soil Covers", In: Proceedings of the Eighth International Waste Management and Landfill Symposium - Sardinia 2001, S. Margherita di Pula, Italy.

- SCHUELER, A.S., 2005, Estudo de Caso e Proposta para Classificação de Áreas Degradadas por Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Doutorado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SENANTE, E., GALTIER, L., BEKAERT, C., LAMBOLEZ-MICHEL, L., BUDKA, A., 2003, "Odours Management at MSW Landfill Sites: Odours Sources, Odorous Compounds and Control Measures", In: Proceedings of the Ninth International Landfill Symposium - Sardinia 2003, S. Margherita di Pula, Cagliari, Italy.
- SILVA, A.C., 2002, Tratamento do Percolado de Aterro Sanitário e Avaliação da Toxicidade. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVA, G, DOMINGUES, E., 1998, Indicadores de Saúde e Meio Ambiente – Projeto Indicadores e Sistema de Informações Ambientais. IBGE, Diretoria de Geociências – Divisão de Estudos da Qualidade Ambiental. Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SILVEIRA, A.M.M., 2004, Estudo do Peso Específico de Resíduos Sólidos Urbanos. Tese de Mestrado, COPPE/UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- SNIS/IPEA, 2004, Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Diagnóstico da Gestão e Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos - 2002, novembro de 2004, disponível em: <http://www.snis.gov.br>. Acesso em 11/2004, Brasília, DF, Brasil.
- SOWERS, G. F., 1973, "Settlement of waste disposal fills". In: Proceedings, Eighth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscou, pp. 207-210.
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H. & VIGIL, S., 1993, Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues. McGraw-Hill Series in Water Resources and Environmental Engineering.
- VRIJHEID, M., DOLK, H., ARMSTRONG, B., et al., 2002, "Chromosomal Congenital Anomalies and Residence Near Hazardous Waste Landfill Sites", The Lancet, v. 359, pp. 320-322.
- WHO, 2000, – World Health Organization, Methods of Assessing Risk to Health from Exposure to Hazards Released from Waste Landfills. Report EUR/00/5016441, WHO Meeting, Lodz, Poland.
- WORLD BANK, 2004, Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe. 1 ed., Washington, DC, USA, World Bank.
- YONG, R.N., MOHAMED, A.M.O., WARKENTIN, B.P., 1992, Principles of Contaminant Transport in Soils. Elsevier, Nova Iorque.