ANÁLISE DE MODELOS DE GERAÇÃO DE GASES EM ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO

Silvia Mary Pereira Borba

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA COORDENAÇÂO 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.

_____

Prof. Maria Cláudia Barbosa, D.Sc.

_____

Prof. Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk, D.Sc.

_____

Prof. João Vicente de Assunção, D.Sc.

RIO DE JANEIRO, RJ – BRASIL
SETEMBRO DE 2006

BORBA, SILVIA MARY PEREIRA

Análise de Modelos de Geração de Gases em Aterros Sanitários: Estudo de Caso [Rio de Janeiro] 2006

XV, 134 p. 29,7 cm (COPPE/UFRJ, M.Sc., Engenharia Civil, 2006)

Dissertação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE

1. Resíduos Sólidos
2. Gás de Aterro
3. Estudo de Caso

I. COPPE/UFRJ II. Título (série)

AGRADECIMETOS

Ao Professor Cláudio Mahler pela orientação neste trabalho, interesse pelo assunto, apoio e confiança sempre brindados.

À empresa S.A. Paulista, responsável pela implantação e gerenciamento da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos de Nova Iguaçu, pela atenção com que sempre recebeu a equipe de Resíduos Sólidos da UFRJ e pelos dados fornecidos.

Aos funcionários do Laboratório de Geotecnia, especialmente ao Max (Toninho) pelo grande auxilio nos trabalhos de campo, ao Sergio pela ajuda nos ensaios de permeabilidade, ao Luiz Carlos, pelos ensaios de caracterização de solo e ao Luiz Almeida pelo apoio brindado em todos os momentos em que foi solicitado.

Ao setor de transporte da COPPE, em especial ao Sr. Laerte da Silva Xavier, Chefe do Setor, que não mediu esforços para auxiliar a execução dos trabalhos.

Ao laboratório de química da COPPE, em especial ao Ayr, que realizou os ensaios de cromatografia dos gases.

À Embrapa solos, pela realização do ensaio de capacidade de campo das amostras de solo.

À professora Amaya Lobo Garcia de Cortazar, por ter enviado o programa Moduelo 2, desenvolvido por ela, junto à equipe de Resíduos Sólidos da Universidade de Cantabria, e ter auxiliado na operação do mesmo.

À professora Begoña Ruiz, da Universidade de Cantabria pela ajuda prestada durante a modelagem, sem a qual não seria possível a conclusão do trabalho.

À professora Ana Ghislane Henriques Pereira van Elk pela leitura do trabalho e pelas valiosas sugestões.

A meu esposo, Dalmo, que soube compreender e apoiar o meu empenho na realização deste trabalho.

A todos os colegas, que acabaram se tornando amigos, pelo apoio brindado e pela solidariedade, em especial a Maria Alice Ferreira.

Ao Brasil, por ter me acolhido tão bem e ter permitindo que eu participasse de um núcleo tão seleto de conhecimento, meu mais sincero agradecimento.

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

ANÁLISE DE MODELOS DE GERAÇÃO DE GASES EM ATERROS SANITÁRIOS: ESTUDO DE CASO

Silvia Mary Pereira Borba

Setembro/2006

Orientador: Cláudio Fernando Mahler

Programa: Engenharia Civil

Este trabalho tem como objetivo investigar as condições de produção de gás do aterro de Nova Iguaçu, visando a avaliação de diferentes métodos utilizados atualmente para o cálculo das emissões.

Ênfase especial é dada ao uso do Programa Moduelo 2, desenvolvido na Universidade de Cantabria, Espanha, no qual são inseridos, além de informações da morfologia do terreno e das características dos resíduos recebidos, dados climatológicos diários.

Com a finalidade de caracterizar o local de estudo são apresentados resultados obtidos em ensaios de permeabilidade da camada de cobertura e dos resíduos, assim como da composição do biogás do aterro.

Os resultados da avaliação dos métodos para o cálculo de geração de metano mostram que a metodologia do Banco Mundial fornece os menores resultados e a metodologia da USEPA os maiores. Já a metodologia do IPCC fornece resultados próximos aos encontrados com a metodologia da USEPA.

Os resultados obtidos com os diferentes modelos analíticos e o software Moduelo 2 apresentaram divergências as quais são provavelmente causadas pelas características diferenciadas de resíduos sólidos e o modelo usado na relação entre o CO_2 e o CH_4. O modelo de previsão empregado foi o do tipo B (Lambe, 1973), ou seja, medidas e modelagens realizadas durante o desenvolvimento da obra.

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

ANALYSIS OF MODELS OF GAS PRODUCTIONS IN LANDFILLS: CASE STUDY

Silvia Mary Pereira Borba

September/2006

Advisor: Cláudio Fernando Mahler

Department: Civil Engineering

This work investigates gas production in the Nova Iguaçú landfill, which is usually considered in biogas forecast models.

Special attention has been given to the software Moduelo 2, developed in the University of Cantabria, Spain. In this software, local morphological information, as well as solid waste characteristics and daily climate data, are provided as basic data.

In order to characterise the site under study, results are presented from permeability tests of the top layer and waste, as well as the composition of the landfill biogas.

The results of the assessment of the methods for calculating methane generation show that the World Bank methodology provides the lowest and the USEPA methodology the highest results. On the other hand, the IPCC methodology provides results close to those found using the USEPA methodology.

The numerical investigation was carried out using different methods, one being software Moduelo 2, and the results proved to be vary somewhat. An investigation is being carried out. The forecast model type B proposed by Lambe (1973) was adopted, which means the forecast and measurement were during the construction of the landfill.

INDICE

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO.....01
CAPÍTULO 02 - A GERAÇÃO DE BIOGÁS NOS ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS E O EFEITO ESTUFA 03
2.1 O EFEITO ESTUFA.....03
2.2 CONTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA.....05
2.3 DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS.....07
2.4 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE ATERRO.....11
2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS.....12
2.5.1 Composição do Resíduo.....12
2.5.2 Umidade.....13
2.5.3 Tamanho das Partículas.....14
2.5.4 Temperatura.....14
2.5.5 pH.....15
2.5.6 Idade do Lixo.....16
2.5.7 Projeto do Aterro.....16
2.5.8 Operação.....17
CAPÍTULO 03 - MODELOS NUMÉRICOS PARA O CÁLCULO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS 18
3.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA USEPA.....19
3.1.1 Sem Sistema de Controle.....19
3.1.2 Com Sistema de Controle.....21
3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PELO BANCO MUNDIAL.....23
3.3 METODOLOGIA IPCC.....24
3.3.1 Determinação do Fator de Correção para o Metano.....25
3.3.2 Constante de Geração.....26
3.3.3 Carbono Orgânico Degradável (COD).....26
3.3.4 Fração do Carbono Orgânico Degradável Assimilado COD_F.....27
3.3.5 Fator de Oxidação OX.....27
3.3.6 Incertezas Associadas.....28

3.4 METODOLOGIA EMPREGADA NA MODELAGEM COM MODUELO 2....29
3.4.1 Dados de Entrada.....29
3.4.2 Módulo de Biodegradação.....33
3.4.2.1 Degradação bioquímica.....34
CAPÍTULO 04 - ESTUDO DE CASO.....40
4.1 DESCRIÇÃO DO MUNICÍPIO..... 40
4.2 A LIMPEZA URBANA NO MUNICÍPIO 41
4.3 A CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE NOVA IGUAÇU.....42
4.3.1 Clima.....44
4.3.2 Descrição do Aterro.....45
4.4 OS RESÍDUOS RECEBIDOS.....49
4.5 INFORMAÇÕES SOBRE AS EMISSÕES PRODUZIDAS.....53
CAPÍTULO 05 – METODOLOGIAS E RESULTADOS ESPERIMENTAIS.....57
5.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DE COBERTURA.....57
5.1.1 Procedimento para Coleta de Amostras.....58
5.1.2 Metodologia Empregada.....59
5.1.3 Resultados Obtidos.....59
5.2 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE VERTICAL E HORIZONTAL DA CAMADA DE COBERTURA.....62
5.2.1 Procedimento para Coleta de Amostras.....62
5.2.2 Metodologia Empregada.....63
5.2.3 Resultados Obtidos.....63
5.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CAMPO.....65
5.3.1 Procedimento de Coleta de Amostras.....65
5.3.2 Metodologia Empregada.....66
5.3.3 Resultados Obtidos.....67
5.4 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS RESÍDUOS UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH.....68
5.4.1 Metodologia Empregada.....68
5.4.2 Procedimento Experimental.....69
5.4.3 Resultados Obtidos.....70
5.5 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DOS GASES PROVENIENTES DOS DRENOS VERTICAIS.....70
5.5.1 Procedimento para Coleta de Amostras.....70

5.5.2 Metodologia Empregada.....72
5.5.3 Resultados Obtidos.....72
5.5.4 Discussão dos Resultados.....76
CAPÍTULO 06 - APLICAÇÃO DOS MODELOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS..... 78
6.1 METODOLOGIAS DA USEPA, BANCO MUNDIAL E IPCC.....78
6.1.1 Parâmetros Utilizados.....78
6.1.2 Resultados Obtidos e Discussão.....79
6.2 MODUELO 2 85
6.2.1 Introdução da Informação Disponível.....85
6.2.1.1 Dados morfológicos.....85
6.2.1.2 Produção.....86
6.2.1.3 Dados climáticos.....88
6.2.1.4 Sensibilidade do modelo.....88
6.2.1.5 Calibração do modelo..... 89
6.2.2 Resultados Obtidos e Discussão.....92
6.3 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DAS PREVISÕES REALIZADAS.....97
CAPÍTULO 07 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....100
CAPÍTULO 08 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....103
ANEXO 1 – CÁLCULO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS POR HABITANTE NO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU.....111
ANEXO 2 – CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA 112
ANEXO 3 – ENSAIOS DE PERMEABILIDADE 116
ANEXO 4 – PERMEABILIDADE UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH.....121
ANEXO 5 – APLICAÇÃO DOS MODELOS DA EPA, BM E IPCC.....122
ANEXO 6 – RESÍDUOS RECEBIDOS NO ATERRO DE NOVA IGUAÇU.....133
ANEXO 7 – CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO.....134

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DAS FONTES DE METANO (APUD, PROSAB, 2003).....4
FIGURA 2.2 – DESTINO FINAL DOS RSU TENDO COMO REFERÊNCIA O NÚMERO DE MUNICÍPIOS (PNSB, 2000).....6
FIGURA 2.3 – EMISSÕES DE METANO DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS NO BRASIL.....7
FIGURA 2.4 - ESQUEMA DE REAÇÕES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE MATERIAIS POLÍMEROS.....8
FIGURA 2.5 – FASES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS 9
FIGURA 3.1 – TELA INICIAL DA MODELAGEM UTILIZANDO MODUELO 2.....30
FIGURA 3.2 – TELA DE INSERÇÃO DE DADOS DE PRODUÇÃO.....31
FIGURA 3.3 – TELA DE EDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA.....31
FIGURA 3.4 – TERRENO DE BASE DIVIDIDO EM CÉLULAS.....32
FIGURA 3.5 - INSERÇÃO DOS PARAMETROS DAS CÉLULAS.....32
FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU –RJ.....40
FIGURA4.2- ILUSTRAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO FINAL DA CTR NOVA IGUAÇU.....43
FIGURA 4.3 - LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DE ANCHIETA.....44
FIGURA 4.4 – TOPOGRAFIA DA BASE DO ATERRO.....45
FIGURA 4.5 – PLANTA ESQUEMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM DE BASE DO ATERRO 47
FIGURA 4.6 - DRENO VERTICAL DEVIDAMENTE IDENTIFICADO.....48
FIGURA 4.7- SISTEMA DE DRENAGEM HORIZONTAL DE CAMADAS.....49
FIGURA 4.8 - SEQUENCIA DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS.....53
FIGURA 5.1 PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO PARA ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E PERMEABILIDADE 58
FIGURA 5.2 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO AMARELO USADO COMO MATERIAL DE COBERTURA NO ATERRO.....60
FIGURA 5.3 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO VERMELHO USADO COMO MATERIAL DE COBERTURA NO ATERRO.....61
FIGURA 5.4 – COLETA DE AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE VERTICAL DA COBERTURA.....62
FIGURA 5.5 – COLETA DE AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE HORIZONTAL DA COBERTURA.....63
FIGURA 5.6 – CILINDROS PARA COLETA DA AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CAMPO 65

FIGURA 5.7 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO.....67
FIGURA 5.8 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE DOS RESÍDUOS UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH.....69
FIGURA 5.9 – COLETA DE AMOSTRAS DO BIOGÁS.....71
FIGURA 5.10 – SERINGAS CONTENDO O BIOGÁS, ACONDICIONADAS EM CAIXAS DE ISOPOR COM GELO.....71
FIGURA 5.11- LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS VERTICAIS.....74
FIGURA 5.12- COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DO ATERRO POR DRENO EM NOVEMBRO DE 2005.....74
FIGURA 5.13 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 2 AO LONGO DO TEMPO.....75
FIGURA 5.14 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 7 AO LONGO DO TEMPO.....76
FIGURA 5.15 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 9 AO LONGO DO TEMPO.....76
FIGURA 6.1 – GERAÇÃO E EMISSÃO DE METANO – METODOLOGIA DA USEPA 81
FIGURA 6.2 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIA RECOMENDADA PELO BANCO MUNDIAL.....82
FIGURA 6.3 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIA DO IPCC.....82
FIGURA 6.4 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIAS USEPA, BM E IPCC.....83
FIGURA 6.5 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIAS USEPA, BM E IPCC.....84
FIGURA 6.6 - VISUALIZAÇÃO DO PREENCHIMENTO DO ATERRO.....87
FIGURA 6.7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS DO NH_3 PARA O ATERRO DE NOVA IGUAÇU 91
FIGURA 6.8 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS DA DBO E DQO PARA O ATERRO DE NOVA IGUAÇU 91
FIGURA 6.9 - GASES GERADOS ANUALMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU.....93
FIGURA 6.10 – GASES GERADOS DIARIAMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU.....93
FIGURA 6.11 - GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS.....94
FIGURA 6.12 - GASES GERADOS DIARIAMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS.....95
FIGURA 6.13 – GERAÇÃO DE CH_4 PREVISTA PARA O PERÍODO DE 2003 A 2005.....96
FIGURA 6.14 – GERAÇÃO DE BIOGÁS PREVISTA PELO MODUELO 2 NOS MESES DE JUNHO E JULHO DE 2005.....97

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DO GÁS DE ATERROS DE RSU.....12
TABELA 3.1 - VALORES DE k e L_0 PROPOSTOS PELA USEPA.....20
TABELA 3.2 - ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE DO LIXO DEPOSITADO.....20
TABELA 3.3. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE CONTROLE (η cont.).....21
TABELA 3.4. CÓDIGOS DE QUALIDADE DOS FATORES DE EMISSÃO.....22
TABELA 3.5 - VALORES PARA K PROPOSTOS EM CORRESPONDÊNCIA COM A PRECIPITAÇÃO ANUAL.....23
TABELA 3.6- VALORES L_0 EM FUNÇÃO DA DEGRADABILIDADE DO RESÍDUO.....24
TABELA 3.7 – FCM RECOMENDADO PELO IPCC.....26
TABELA 3.8 - VALORES RECOMENDADOS PARA O COD NOS PRINCIPAIS TIPOS DE RESÍDUOS.....27
TABELA 3.9 - INCERTEZA ASSOCIADA AOS PARÁMETROS SUGERIDOS PELO IPCC...28
TABELA 3.10 - CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA NO MODUELO PARA OS PRINCIPAIS COMPONENTES DO RESÍDUO SEGUNDO SUA BIODEGRADABILIDADE.....33
TABELA 3.11 - REAÇÕES DE DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO MODUELO 2 – HIDRÓLISE.....36
TABELA 3.12 - REAÇÕES DE DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO MODUELO 2 – ACETOGÊNESE E METANOGÊNESE.....37
TABELA 3.13 – VALORES DAS TAXAS DE DEGRADAÇÃO DO RESÍDUO RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE OUTROS AUTORES.....39
TABELA 4.1- RESÍDUOS DEPOSITADOS NA CTR NOVA IGUAÇU NO ANO DE 2003 (TONELADAS).....50
TABELA 4.2 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO BAIRRO DE BANGU –RJ.....51
TABELA 4.3 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA PARA OS RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU (CALCUALDA / ADOTADA) 51
TABELA 4.4 - PRINCIPAIS RESÍDUOS CLASSE IIA RECEBIDOS NA CTR NOVA IGUAÇU NOS ANOS DE 2004 E 2005.....52
TABELA 4.5 –CARACTERIZAÇÃO FISICO-QUIMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2003.....54
TABELA 4.6 – CARACTERIZAÇÃO FISICO-QUIMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2004.....55
TABELA 4.7 – CARACTERIZAÇÃO FISICO-QUIMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2005.....55
TABELA 4.8 – LEITURAS MENSAIS DE LIXIVIADO PERCOLADO NO PERÍODO DE 2003 A 2005 NO ATERRO DE NOVA IGUAÇU 56
TABELA 5.1 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO.....61
TABELA 5.2 – LIMITES DE ATTERBERG DO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO.....61

TABELA 5.3 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE.....64
TABELA 5.4 – ANALISE CROMATOGRAFICA DOS GASES REALIZADA EM NOVEMBRO DE 2005 NA CTR NOVA IGUAÇU.....73
TABELA 5.5 – ANALISE CROMATOGRAFICA DOS GASES CH_4 E CO_2 NO ANO DE 2004 NA CTR NOVA IGUAÇU.....75
TABELA 6.1 – VALORES DE L_0 E k RECOMENDADOS.....78
TABELA 6.2 – GERAÇÃO DE CH4 CONSIDERANDO APENAS OS RSU.....79
TABELA 6.3 – GERAÇÃO TOTAL DE CH4 NO PERÍODO MONITORADO.....80
TABELA 6.4 – GERAÇÃO DE CH_4 PREVISTA PARA O ANO DE 2007 (m^3).....84
TABELA 6.5- CARACTERISTICAS DA DRENAGEM IMPLANTADA.....85
TABELA 6.6 - CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DAS CÉLULAS DO ATERRO.....86
TABELA 6.7 – MÉDIA DAS CÉLULAS PREECHIDAS MENSALMENTE NO ATERRO.....87
TABELA 6.8 – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM UMA CÉLULA DE RESÍDUOS.....90
TABELA 6.9 GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU.....92
TABELA 6.10 – GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS.....92
TABELA 6.11 – CLASSIFICAÇÃO DAS PREVISÕES 98

LISTA DE SIMBOLOS E ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
BM	Banco Mundial
C	Carbono
Cc	Capacidade de campo
CETESB	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental
CH_4	Metano
CO_2	Dióxido de Carbono
COPPE	Coordenação dos Programas de Pós-graduação de Engenharia
COMLURB	Companhia de Limpeza Urbana do Município do Rio de Janeiro
COD	Carbono orgânico degradável
COD_F	Fração do carbono orgânico degradável que se degrada
CTR	Central de Tratamento de Resíduos
DBO	Demanda bioquímica de oxigênio
DQO	Demanda química de oxigênio
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EMLURB	Empresa Municipal de Limpeza Urbana de Nova Iguaçu
USEPA	Environmental Protection Agency- United States of America
F	Fração de metano no gás de aterro
f_{ar}	Fator de arraste
FCM	Fator de correção do metano
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
k	Taxa de geração de metano
k_A	Constante de acetogênese
k_{AC}	Constante de metanogênese acetofílica
k_{fs}	Condutividade hidráulica de saturação de campo
k_h	Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica – horizontal
kh_r	Constante de hidrólise – material biodegradável rapidamente
kh_l	Constante de hidrólise – material biodegradável lentamente
k_{H2}	Constante de metanogênese hidrogenofílica
k_v	Coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica – vertical
IP	Índice de plasticidade
L_0	Potencial de geração de metano
LL	Limite de liquidez
LP	Limite de plasticidade

m_i	Massa de resíduos despejada no ano i
MODUELO	Software cedido pela Universidade de Cantábria
N	Nitrogênio
N_2	Nitrogênio molecular
N-NH_3	Nitrogênio amoniacal
NBR	Norma Brasileira Registrada
O	Oxigênio
OD	Oxigênio dissolvido
OX	Fator de oxidação
pH	Potencial hidrogeniônico
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
R	Média anual de entrada de lixo no vazadouro
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RSS	Resíduos de Serviços de Saúde
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
t	tempo
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro
θr	Umidade residual
θs	Umidade de saturação

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

A disposição e tratamento de resíduos municipais e industriais podem produzir emissões dos mais importantes gases causadores do efeito estufa.

Com o aumento da população mundial hoje estimada em 6,0 bilhões e o grau de urbanização que representa 75% do total da população vivendo em cidades, torna-se clara a necessidade de um correto gerenciamento da disposição final de resíduos sólidos urbanos (RSU).

Devido principalmente ao baixo custo, a prática da utilização de áreas para aterramento de lixo é a mais comum quando comparada às outras formas de tratamento dos RSU como incineração e compostagem.

A concepção de aterros sanitários que além de promover o correto armazenamento do lixo, possuam um aproveitamento adequado do biogás gerado ao longo do tempo, possibilita uma maior eficiência na produção e captação do metano na massa de resíduos contribuindo, ainda, para a redução das emissões de gases à atmosfera.

Mas ainda há uma grande incerteza no cálculo das emissões geradas por aterros de resíduos: a variedade de processos que ocorre na massa de resíduos somada à falta de monitoramento dos aterros faz com que os métodos de cálculo sejam geralmente fórmulas empíricas contendo poucos parâmetros de avaliação.

Desta forma este trabalho tem como objetivo investigar as condições de produção de gás do aterro de Nova Iguaçu, no qual foi realizado o estudo, visando a avaliação de diferentes métodos utilizados atualmente para o cálculo das emissões, com ênfase especial no Programa Moduelo 2. Neste modelo são inseridos além de informações da morfologia do terreno e das características dos resíduos recebidos, dados climatológicos diários. As previsões numéricas dos modelos estudados são comparadas com os valores medidos de produção de gás do aterro.

Assim, este trabalho apresenta uma abordagem sobre os processos de geração de metano em aterros e sua contribuição para a intensificação do efeito estufa, seguido por uma revisão dos processos de decomposição de resíduos e geração de gás no seu segundo capítulo.

No terceiro capítulo é apresentada uma revisão dos métodos de cálculo para geração de gás em aterros empregados pelo Banco Mundial, pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) e pelo Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), além de apresentar a metodologia do programa Moduelo 2.

No quarto capítulo é apresentado o município em que se realiza o estudo de caso e o aterro analisado, do qual são extraídas informações relevantes para esta dissertação.

No quinto capítulo apresentam-se os métodos utilizados na coleta de amostras e nos ensaios de campo e laboratório, assim como os resultados obtidos nas análises.

No sexto capítulo apresentam-se a aplicação dos modelos apresentados no Capítulo 3 e a discussão dos resultados obtidos.

Para finalizar, o sétimo capítulo traz as conclusões sobre o trabalho desenvolvido assim como sugestões para futuros estudos.

CAPÍTULO 2 - A GERAÇÃO DE BIOGÁS NOS ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS E O EFEITO ESTUFA

2.1 O EFEITO ESTUFA

A energia proveniente do sol produz mudanças na temperatura da Terra e esquenta a superfície terrestre, que por sua vez irradia energia novamente ao espaço. Os gases atmosféricos do efeito estufa retêm parte dessa energia que sai da Terra, mantendo assim uma temperatura estável no planeta.

Alguns gases do efeito estufa são produzidos de forma natural, enquanto outros são resultado de atividades humanas. Entre os gases do efeito estufa produzidos de forma natural estão o vapor de água, dióxido de carbono, metano, óxido nitroso e o ozônio. Porém, certas atividades humanas aumentam os níveis da maioria destes gases produzidos de forma natural.

Desde o começo da Revolução Industrial, o grande consumo de combustíveis fósseis pela sociedade moderna tem levado o planeta a uma degradação ambiental sem precedentes, destacando-se entre os impactos decorrentes, a intensificação do efeito estufa.

O dióxido de carbono é liberado na atmosfera quando são queimados resíduos sólidos, combustíveis fósseis, madeira e produtos de madeira.

As principais fontes de emissão de metano são: a extração e transporte de carvão mineral e gás natural e industria petroquímica, a criação de gado, devido à fermentação entérica dos ruminantes, as bactérias presentes nos pântanos e arrozais, a queima de biomassa, a decomposição de resíduos orgânicos em aterros, o tratamento de esgoto e os dejetos de animais. A Figura 2.1 apresenta a distribuição global das fontes de metano.

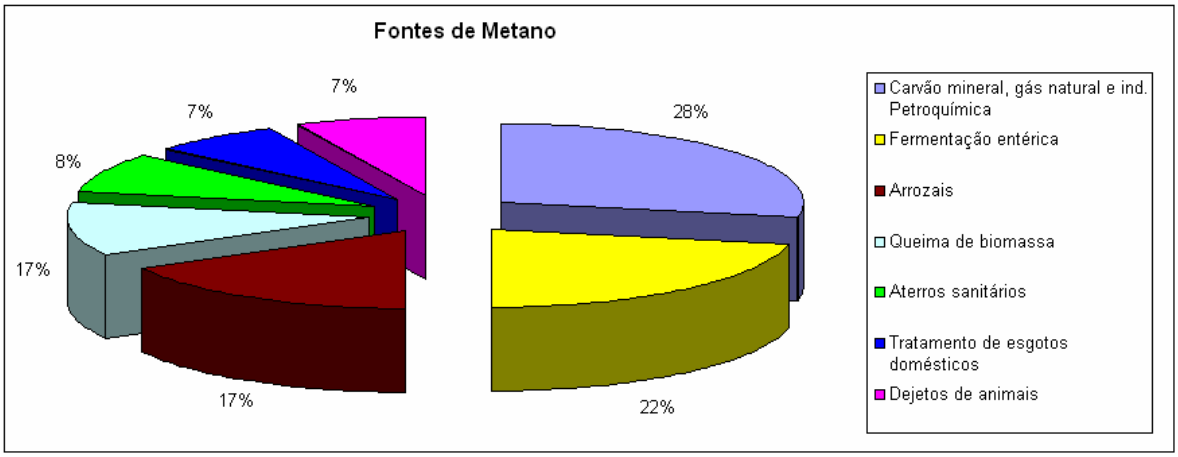


FIGURA 2.1 – DISTRIBUIÇÃO GLOBAL DAS FONTES DE METANO (APUD, PROSAB, 2003)

O óxido nitroso se libera durante as atividades agrícolas e industriais, assim como durante a combustão de resíduos sólidos e resíduos fósseis.

Entre os gases de efeito estufa potentes que não se produzem de forma natural estão os hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e o hexafluoreto de enxofre (SF_6), os quais são gerados em uma variedade de processos industriais.

Cada gás de efeito estufa se diferencia pela sua capacidade de absorver calor na atmosfera. Os HFCs e PFCs são os que mais absorvem calor. O óxido nitroso absorve 270 vezes mais calor por molécula que o dióxido de carbono. O poder de retenção de calor do metano, comparado ao dióxido de carbono ainda está sendo discutido pela comunidade científica, o metano que era considerado como capas de absorver 21 vezes mais calor que o dióxido de carbono, teve este valor alterado para 23 vezes e atualmente este valor esta sendo revisto, estimando-se que o metano retém apenas sete vezes mais calor que o dióxido de carbono.

Segundo a USEPA (2006) desde o começo da Revolução Industrial as concentrações atmosféricas de dióxido de carbono aumentaram cerca de 30%, as concentrações de metano dobraram e as concentrações de oxido nitroso aumentaram mais de 15%. Estes incrementos melhoraram a capacidade da atmosfera para reter calor, estimando-se que nos próximos 100 anos a temperatura global sofra um aumento entre 1,4 e 5,8 ºC. Este fato é grave pois as calotas polares deixarão de existir.

2.2 CONTRIBUIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NA GERAÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA

A rápida urbanização que o Brasil tem assistido nas últimas décadas tem acarretado impactos ambientais de toda espécie, seja na água, no solo e/ou no ar. A grande geração de resíduos sólidos, resultante do estilo de produção e consumo vigentes, resulta no surgimento de inúmeros vazadouros a céu aberto, que apresentam como subproduto gases liberados ao ambiente, onde se destaca o metano, compondo mais de 50% do total dos gases gerados.

No Brasil, a geração de resíduos sólidos municipais está estimada em cerca de 174 mil toneladas por dia, com composição variável de acordo com a região, sendo que a geração de resíduos por habitante de uma cidade brasileira varia entre 0,4 e 0,7kg/hab.dia, ABRELPE (2005).

De acordo coma PNSB (2000) a quantidade de resíduos sólidos gerados diariamente no Brasil varia de acordo com a região, entre 0,79 e 1,96 kg/hab/dia. A grande discrepância entre os valores se deve a presença dos resíduos não domiciliares. Segundo a mesma pesquisa a geração média *per capita* é de 1,35 kg/dia.

Segundo a Pesquisa Nacional sobre Saneamento Básico (2000), referência nacional e fonte principal de dados sobre a gestão de resíduos sólidos e limpeza urbana no Brasil, a disposição e o tratamento de resíduos sólidos distribuem-se da seguinte forma: 69% depositados em lixões[1] a céu aberto, 13% em aterros controlados[2], 13,8 % em aterros sanitários[3], 4,2% têm outra destinação, como as usinas de compostagem e a incineração, como apresentado na Figura 2.2.

[1] Lixão é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos municipais, que se caracteriza pela simples descarga sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou a saúde pública (IPT, 2000)

[2] Aterro controlado é definido como um método que utiliza alguns princípios da engenharia para confinar os resíduos sólidos, cobrindo-os com uma camada de material inerte na conclusão de cada jornada de trabalho (IPT, 2000).

[3] Aterro sanitário é definido como uma técnica de disposição dos resíduos sólidos no solo, sem causar danos à saúde e à segurança pública, minimizando os impactos ambientais; método este que utiliza princípios de engenharia para confinar resíduos sólidos na menor área possível e reduzi-lo ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou em intervalos menores, se necessário. (ABNT, NBR-8419/84).

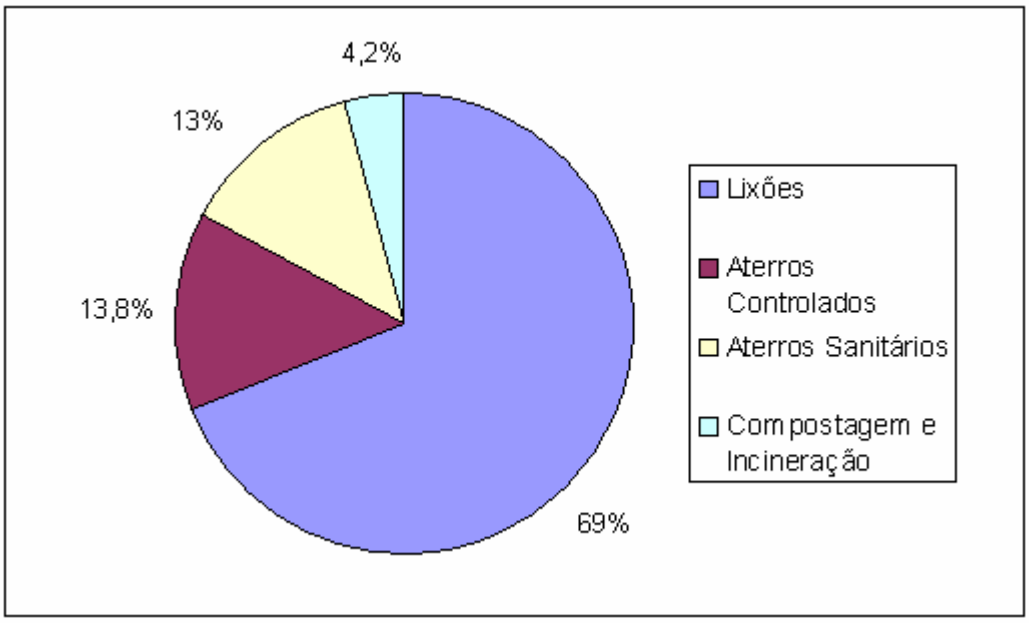


FIGURA 2.2 – DESTINO FINAL DOS RSU TENDO COMO REFERÊNCIA O NÚMERO DE MUNICÍPIOS (PNSB, 2000).

Geralmente, a geração de gás inicia-se após a disposição dos resíduos sólidos, encontrando-se, segundo valores apresentados por Tchobanoglous et al (1994), registros de metano ainda nos primeiros três meses após a disposição, podendo continuar por um período de 20, 30 ou até mais anos depois do encerramento do aterro. Alguns índices apresentados pelo Banco Mundial (2003), indicam que aproximadamente 20% das emissões de metano liberadas na atmosfera provêm dos aterros de resíduos e águas servidas.

O gás proveniente dos aterros contribui consideravelmente para o aumento das emissões globais de metano. As estimativas das emissões globais de metano, provenientes dos aterros, oscilam entre 20 e 70 Tg/ano, enquanto que o total das emissões globais pelas fontes antropogênicas equivale a 360 Tg/ano, indicando que os aterros podem produzir cerca de 6 a 20 % do total de metano (IPCC, 1995 apud CETESB, 2002).

Segundo o Primeiro Inventário de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa, realizado pela CETESB em 2002, as emissões de metano por resíduos sólidos no Brasil, para o ano de 1990, foram estimadas em 618 Gg, aumentando para 677 Gg no ano de 1994. As emissões de metano geradas no tratamento dos resíduos líquidos de origem doméstica e comercial foram estimadas em 39 Gg para o ano de 1990, subindo para 43 Gg em 1994. As emissões de metano decorrentes do tratamento de

resíduos líquidos de origem industrial foram estimadas em 79 Gg em 1990 e 83 Gg em 1994. As emissões totais de metano provenientes do tratamento de resíduos totalizaram 737 Gg em 1990 e 803 Gg em 1994, como apresentado na Figura 2.3, tendo aumentado 9% nesse período. Com os valores apresentados podemos concluir que mais de 84 % das emissões de metano no Brasil oriundas do tratamento de resíduos são provenientes de aterros de resíduos.

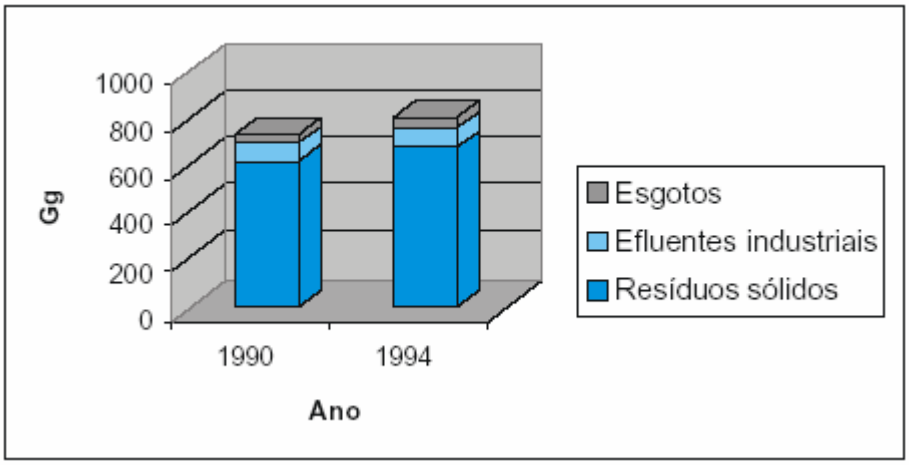


FIGURA 2.3 – EMISSÕES DE METANO DO TRATAMENTO DE RESÍDUOS NO BRASIL (CETESB, 2002)

A simples queima do gás metano em flares ou seu aproveitamento para geração de energia contribuem significativamente para a minimização dos gases que aumentam o efeito estufa. Estes procedimentos podem gerar, ainda, créditos de carbono através do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, previsto pelo Protocolo de Kyoto[4].

2.3 DECOMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS

Um aterro de resíduos sólidos pode ser considerado como um reator biológico onde as principais entradas são os resíduos e a água e as principais saídas são os gases e o chorume.

[4] É um acordo internacional patrocinado pela ONU, firmado em 1997 por 59 países, na cidade de Quioto, no Japão. O 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 (GEEs) 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 os países emergentes.

A decomposição da matéria orgânica ocorre por dois processos, o primeiro processo é de decomposição aeróbia e ocorre normalmente no período de deposição do resíduo. Após este período, a redução do O_2 presente nos resíduos dá origem ao processo de decomposição anaeróbia.

A decomposição da matéria orgânica complexa é apresentada em Lobo (2003), como uma série de etapas de degradação anaeróbia que começam pela hidrólise do sólido orgânico, dando origem a polímeros mais simples como proteínas, carboidratos e lipídios que, por sua vez, são hidrolisados e formam açúcares, aminoácidos e ácidos graxos voláteis de alto peso molecular. Os aminoácidos e açúcares são transformados em produtos intermediários (ácidos voláteis) ou são fermentados produzindo ácido acético, em ambos os casos é gerada amônia. Os ácidos graxos de cadeia longa são decompostos em produtos intermediários e hidrogênio. Os produtos da degradação final são o dióxido de carbono e o metano. A Figura 2.4 resume as etapas de decomposição apresentadas acima.

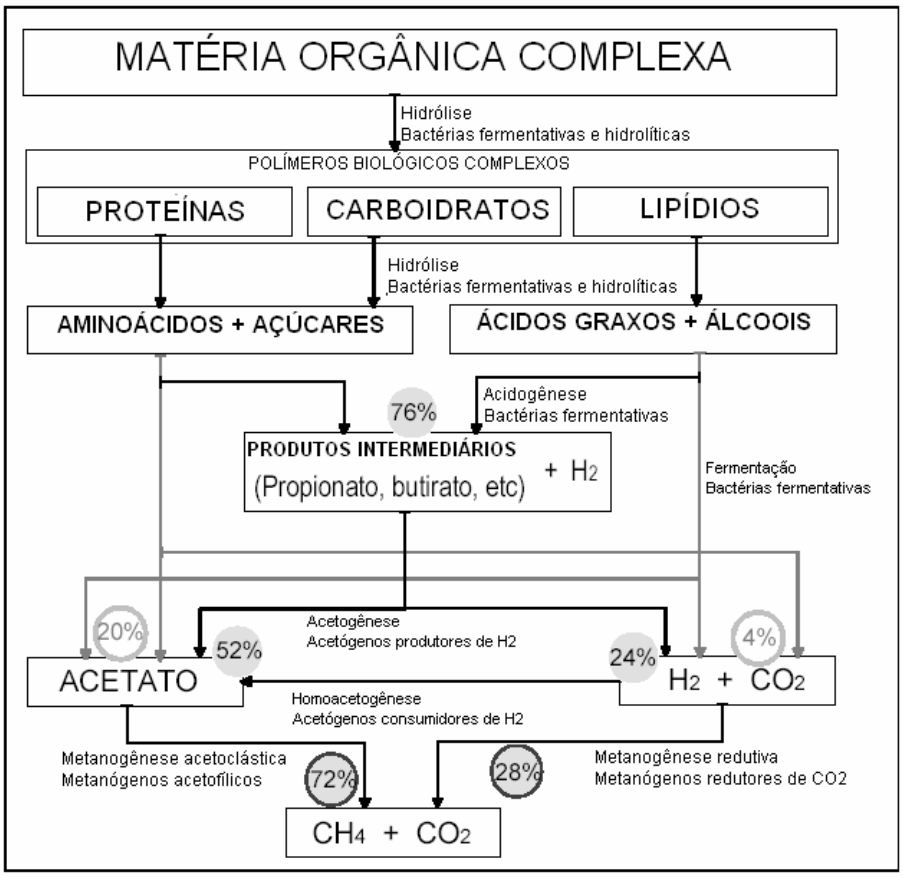


FIGURA 2.4 - ESQUEMA DE REAÇÕES NA DIGESTÃO ANAERÓBIA DE MATERIAIS POLÍMEROS (APUD LOBO, 2003).

Tchobanoglous et al (1994), descrevem a geração de gás em aterros de resíduos em cinco fases, ou quatro se for desconsiderada a segunda, por ser uma fase de transição. Estas fases são ilustradas abaixo na Figura 2.5 e descritas logo a seguir.

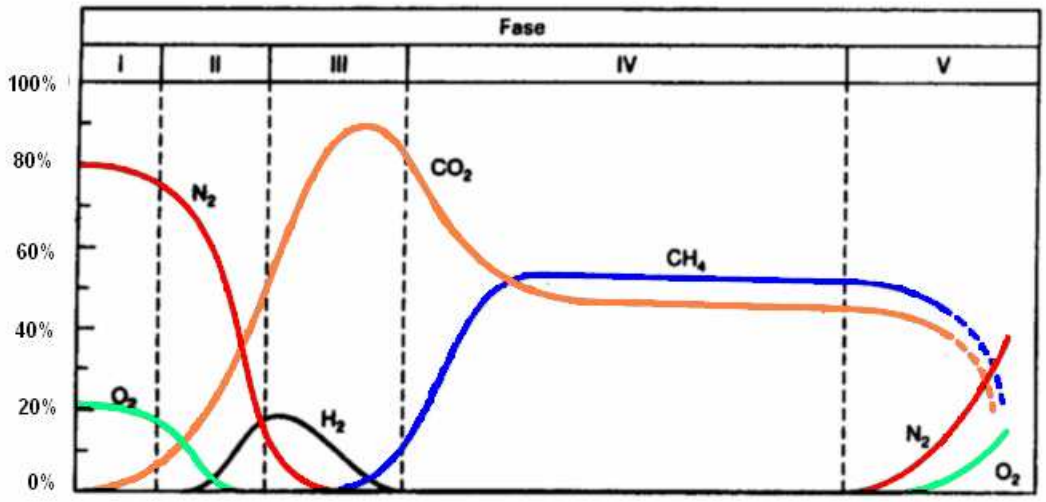


FIGURA 2.5 – FASES DE GERAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS DE RESÍDUOS SÓLIDOS (APUD TCHOBANOGLOUS ET AL, 1994).

Fase I: Ajuste inicial. Fase em que os resíduos são depositados no aterro e sua fração biodegradável sofre a decomposição biológica em condições aeróbias. A fonte principal de microorganismos aeróbios e anaeróbios, responsável pela decomposição dos resíduos, é o solo empregado na cobertura diária e final. Outras fontes de microorganismos podem ser o lodo de estações de tratamento, depositado em alguns aterros, e a recirculação do chorume. Esta fase, em que a decomposição é aeróbia, se estende por um período de poucos dias após a execução da camada de cobertura, diminuindo a presença de oxigênio.

Fase II: Transição. Fase em que decrescem os níveis de oxigênio e começa a fase anaeróbia. Enquanto o aterro é convertido em anaeróbio, o nitrato e o sulfato, que podem servir como receptores de elétrons em reações de conversão biológica, frequentemente são reduzidos a gás nitrogênio e sulfuro de hidrogênio. O início das condições anaeróbias pode ser verificado através do potencial de oxidação e redução que possui o resíduo. Com a queda do potencial de óxido-redução os microorganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciam a conversão do material orgânico complexo em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nesta fase o pH do chorume começa a

cair devido à presença de ácidos orgânicos e pelo efeito das elevadas concentrações de CO_2 dentro do aterro.

Fase III: Ácida. Fase que antecede a formação de metano, em que as reações iniciadas na fase de transição são aceleradas com a produção de quantidades significativas de ácidos orgânicos e pequenas quantidades de gás hidrogênio. A acidogênese envolve a conversão microbiológica dos compostos resultantes da primeira etapa em compostos intermediários com baixa massa molecular, como o ácido acético (CH_3COOH) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O dióxido de carbono é o principal gás gerado durante a fase III. Também serão produzidas quantidades menores de hidrogênio. Os microorganismos envolvidos nesta conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias e facultativas. As demandas bioquímica (DBO) e química de oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante esta fase devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. O pH do chorume, se este é formado, é muito baixo (4 – 5), devido à presença de ácidos orgânicos e pelas elevadas concentrações de CO_2 dentro do aterro. Também devido ao baixo pH, constituintes inorgânicos como os metais pesados serão solubilizados.

Fase IV: Metanogênica: Nesta fase de fermentação do metano predominam microrganismos estritamente anaeróbios, denominados metanogênicos, que convertem ácido acético e gás hidrogênio em CH_4 e CO_2.

A formação do metano e dos ácidos prossegue simultaneamente, embora a taxa de formação dos ácidos seja reduzida consideravelmente. O pH do chorume nesta fase ascenderá a valores na faixa de 6,8 a 8,0. A seguir o pH continuará subindo e serão reduzidas as concentrações de DBO5, DQO e o valor da condutividade do chorume. Com valores mais elevados de pH, menos constituintes inorgânicos permanecerão dissolvidos, tendo como conseqüência a redução da concentração de metais pesados no chorume.

Fase V: Maturação. Esta fase ocorre após grande quantidade do material ter sido biodegradado e convertido em CH_4 e CO_2 durante a fase metanogênica. Como a umidade continua migrando pela massa de lixo, porções de material biodegradável até então não disponíveis acabam reagindo. A taxa de geração do gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes disponíveis foi consumida nas fases anteriores e os substratos que restam no aterro são de degradação lenta. Dependendo

das medidas no fechamento do aterro, pequenas quantidades de nitrogênio e oxigênio podem ser encontradas no gás do aterro.

A duração de cada fase de geração de gás variará conforme a distribuição dos componentes orgânicos no aterro, a disponibilidade de nutrientes, a umidade dos resíduos, a passagem de umidade pelo aterro e o grau de compactação inicial.

Em condições normais, a velocidade de decomposição, medida através da produção de gás, chega a um máximo nos dois primeiros anos e logo decresce lentamente por 25 anos ou mais. Porém, as fases de um aterro não podem ser claramente definidas, já que novos resíduos são dispostos diariamente. Desta forma, enquanto alguns locais com resíduos novos estão passando pela fase aeróbia, outros locais com resíduos mais antigos estão passando por fases de geração de metano.

2.4 COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DE ATERRO

O gás de aterro é composto por vários gases, alguns presentes em grandes quantidades como o metano e o dióxido de carbono e outros em quantidades em traços.

Os gases presentes nos aterros de resíduos incluem o metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), amônia (NH_3), hidrogênio (H_2), gás sulfídrico (H_2S), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2). Na Tabela 2.1 é relacionada à distribuição percentual dos principais componentes do gás de aterro, para a fase metanogênica, apresentada por Tchobanoglus et al (1994).

TABELA 2.1 - COMPOSIÇÃO TÍPICA DO GÁS DE ATERROS DE RSU

COMPOSIÇÃO	PORCENTAGEM (BASE SECA)
METANO	45-60
DIÓXIDO DE CARBONO	40-60
NITROGÊNIO	2-5
OXIGÊNIO	0,1-1,0
ENXOFRE, MERCAPTANOS, ETC.	0-1,0
AMÔNIA	0,1-1,0
HIDROGÊNIO	0-0,2
MONÓXIDO DE CARBONO	0-0,2
GASES EM MENOR CONCENTRAÇÃO	0,01-0,6

FONTE: TCHOBANOGLOUS ET AL (1994)

O metano e o dióxido de carbono são os principais gases provenientes da decomposição anaeróbia dos compostos biodegradáveis dos resíduos orgânicos.

Segundo Tchobanoglous et al (1994), a distribuição exata do percentual de gases variará conforme a antiguidade do aterro.

Brito Filho (2005), relata para ensaios realizados nos gases provenientes do aterro sanitário de Nova Iguaçu, localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, valores de metano variando entre 44 e 76% e valores de dióxido de carbono variando entre 8 e 15%. No aterro controlado “Terra Brava”, também localizado na região metropolitana do Rio de Janeiro, o autor relata quantidades de metano variando entre 40 e 76%, para valores de dióxido de carbono variando entre 7 e 15%.

Real (2005), ao estudar os gases presentes no Lixão de Paracambí, localizado no Município de Paracambí, Estado do Rio de Janeiro, apresenta quantidades de metano variando entre 64 e 72% e valores de dióxido de carbono inferiores a 10%.

2.5 FATORES QUE INFLUENCIAM A PRODUÇÃO DE BIOGÁS

2.5.1 Composição do Resíduo

A maioria dos resíduos residenciais e comerciais de um município é biodegradável, o restante consiste tipicamente em materiais inertes tais como

concreto, cinzas, solo, materiais plásticos e outros materiais que não se decompõem, porém, o lixo de um município pode ter variações sazonais ao longo do ano, dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população.

A composição dos resíduos que chegam ao aterro afeta a produção de gases de forma qualitativa e quantitativa. Quanto maior o percentual de materiais biodegradáveis, maior será a quantidade de substrato para os microrganismos responsáveis pela biodegradação do resíduo, aumentando a taxa de geração de gases.

2.5.2 Umidade

Para muitos aterros, depois da composição, a umidade contida nos resíduos é o fator mais significativo na produção do biogás (Qian et al, 2001).

As condições de umidade dentro do aterro dependem de muitos fatores: um deles é a umidade inicial do resíduo, ou seja, a umidade com que os resíduos chegam ao aterro. Outros fatores são a impermeabilização de fundo, a pluviosidade da região, o tipo de cobertura e a prática ou não de recirculação.

Na maior parte dos casos os resíduos sólidos quando são depositados nos aterros não estão saturados, porém dois fatores contribuem para saturar os resíduos, primeiramente a água proveniente das chuvas e depois a pressão das camadas superiores sobre as outras. Uma vez que a saturação é alcançada, a pressão da água livre acelera as reações químicas e biológicas (Pereira, 2000).

Segundo Junqueira (2000), em períodos chuvosos é favorecida a entrada de uma carga extra de oxigênio dissolvido na água o que possibilita um incremento das atividades das bactérias aeróbias e facultativas, o que leva consequentemente a um aumento na temperatura na massa de resíduos em função das atividades exotérmicas dos microorganismos. O autor relata que verificou variações bruscas de temperatura na massa de resíduos em períodos chuvosos, e que estas variações favorecem a desestabilização dos microorganismos anaeróbios provocando uma diminuição na velocidade de degradação da matéria orgânica.

Coumoulos et al (1995) em Silveira, A M (2004), medindo o teor de umidade em um aterro na Grécia, encontrou para uma profundidade de 15m, valores maiores que 60%, sendo que abaixo desta profundidade foi verificado um decréscimo até a profundidade de 30m, sendo medido um valor de 40%.

Segundo o U.S. Army Corps of Engineers (1995), a umidade de maximização da atividade microbiana na produção de biogás varia de 50 a 60%. Por outro lado, Jucá e Maciel (1999) verificaram altas taxas de decomposição dos resíduos no aterro de Muribeca para umidades variando entre 20 e 40% (Apud Maciel, 2003).

2.5.3 Tamanho das Partículas

Há uma relação inversamente proporcional entre a superfície exposta dos resíduos e o tamanho dos mesmos, expressa pela superfície específica (área da superfície / volume). Desta forma observa-se um aumento da velocidade de degradação quando a massa é composta por resíduos menores, o que tem conduzido ao uso de trituradores, por exemplo na compostagem e nos processos mecânico-biológicos. Vale observar que o tamanho das partículas tem influência na degradação dos resíduos, seja em processos aeróbios, seja anaeróbios.

2.5.4 Temperatura

A temperatura tem importante significado no processo de decomposição de resíduos, pois atua na cinética das reações bioquímicas responsáveis pela conversão de resíduos em gases, líquidos e compostos bioestabilizados (Monteiro, 2003).

Segundo Junqueira (2000), as temperaturas no interior da massa de lixo são de grande importância principalmente no que se refere à atividade de microorganismos que promovem a degradação dos diversos componentes do lixo.

Do ponto de vista biológico, a temperatura da célula de aterro é um fator de grande importância, pois os microorganismos que atuam no processo não controlam a sua própria temperatura corporal, seguindo a temperatura do meio. As bactérias metanogênicas, por exemplo, são bastante sensíveis às bruscas mudanças de temperatura (Monteiro, 2003).

Há dois aspectos a serem considerados com relação à temperatura: um é a temperatura desenvolvida dentro da massa de resíduos e a outra é a influência da temperatura externa sobre os processos que ocorrem internamente.

A faixa ótima de temperatura para geração de metano é de 30 a 40ºC, sendo que temperaturas abaixo dos 15ºC propiciam severas limitações para a atividade metanogênica (Mc Bean et al, 1995).

Flutuações de temperatura são comuns na parte mais elevada do aterro, como resultado das mudanças na temperatura local.

Qian et al, (2002), relata que os resíduos a profundidades superiores a 15m não são afetados pelas temperaturas ambientes.

Juca e Maciell (1999) relatam que no Aterro de Muribeca, situado na região metropolitana de Recife, que possui características climáticas tropicais, a temperatura ambiente só influencia até 2,5m de profundidade.

2.5.5 pH

Inicialmente os aterros apresentam pH ácido, que aumenta e se aproxima da neutralidade a partir do começo da fase metanogênica.

Christensen et al. (1992), in Pereira (2000), observa uma faixa de variação de pH para geração de metano entre 6 e 8.

Segundo Monteiro (2003), as bactérias metanogênicas são as mais sensíveis à variação do pH, sendo que a faixa ótima para digestão anaeróbia varia de 6,5 a 7,6.

Qian et al. (2002) relatam que o pH ótimo para as bactérias está entre 6,7 e 7,5 e dentro desta faixa se desenvolve a metanogênese onde a geração de gás metano é maximizada.

Para um pH abaixo de 6 ou acima de 8 a produção de metano é severamente limitada.

2.5.6 Idade do Lixo

O processo de geração de gás em aterros produz-se em cinco fases, sendo que a geração de metano começa na terceira fase, sendo intensificada na quarta fase que é a fase metanogênica. A duração de cada fase depende das condições próprias de cada aterro.

Num aterro os resíduos vão sendo depositados ao longo do tempo e os processos de decomposição os afetam de forma diferente, conforme a fase em que se encontram. Resíduos novos possuem maior potencial de geração de metano do que resíduos antigos que, em condições de umidade adequada, já passaram pelos processos de biodegradação.

2.5.7 Projeto do Aterro

Atualmente os projetos de aterros de resíduos sólidos procuram otimizar a geração de metano e controlar a produção de chorume. Para isso os projetos utilizam três elementos básicos.

A impermeabilização de fundo tem a função de impedir que o chorume se infiltre no solo, contaminando o lençol freático, e que o biogás migre por fendas do terreno podendo acumular-se, já que seu peso específico é menor que o do ar, sob edifícios ou outros lugares fechados próximos ou dentro do aterro.

A drenagem de chorume também é importante, porque se ela não for eficaz pode haver um aumento da umidade na massa de lixo, reduzindo a degradação da matéria orgânica e consequentemente a geração de biogás. Como já foi mencionado, a geração de biogás depende da umidade do lixo. Os poços de drenagem constituem outro importante elemento que possibilita a captação e recuperação energética do biogás.

A cobertura adequada dos resíduos impede o ingresso de água proveniente do escoamento superficial, evitando a saturação da massa de resíduos e diminuindo a produção de chorume, além disso a cobertura dificulta a entrada de oxigênio provocando a redução da fase aeróbia e acelerando o começo dos processos

anaeróbios, onde é gerado o metano. A cobertura também tem a importante função de evitar a fuga de biogás para atmosfera.

2.5.8 Operação

Quanto maior a compactação dos resíduos, menor a presença de oxigênio na massa, o que, sob esse aspecto, diminui o processo aeróbio, tendo como conseqüência uma possível antecipação na produção de metano. Por outro lado a maior compactação diminui a superfície de exposição e dificulta a passagem dos líquidos e gases.

A prática da recirculação de chorume pode recuperar a umidade dos resíduos nos períodos mais secos favorecendo os processos de degradação. A recirculação também diminui as elevadas concentrações de DBO e DQO, causadas pelos ácidos orgânicos na decomposição dos resíduos no interior do aterro, proporcionando o rápido desenvolvimento de uma população de bactérias anaeróbias ativas produtoras de metano (IPT,2000).

CAPÍTULO 3 - MODELOS NUMÉRICOS PARA O CÁLCULO DA GERAÇÃO DE BIOGÁS

Neste capítulo são apresentadas as metodologias de cálculo de geração de metano apresentadas pela USEPA, Banco Mundial e IPCC e o modelo Moduelo 2 que fornece a geração e composição do gás.

As equações apresentadas pela USEPA, Banco Mundial e IPCC têm em comum o fato de serem equações cinéticas de primeira ordem e considerar os mesmos parâmetros de entrada, listados abaixo:

- Massa de resíduos que ingressa ao aterro anualmente
- Tempo de atividade do aterro e/ou após o fechamento
- Taxa de geração de metano (k)
- Potencial de geração de metano (L_0)

A capacidade potencial de geração de metano L_0 depende unicamente do tipo de resíduos presentes, e varia entre 5 e 310 m^3 CH_4 / t resíduo. Quanto maior o conteúdo de celulose, maior será o valor de L_0.

A taxa de geração de metano determina a rapidez de geração do biogás e de esgotamento do vazadouro. É função da umidade do resíduo, tipo de resíduo, disponibilidade de nutrientes para o processo anaeróbico, pH e temperatura.

As taxas mais rápidas (k=0,2 ou uma meia vida de aproximadamente 3 anos) estão vinculadas a condições de elevada umidade e materiais rapidamente degradáveis, como os restos de alimentos. As taxas de decomposição mais lentas (k=0,03 ou uma meia vida de aproximadamente 23 anos) se associam a aterros de resíduos secos e a resíduos de degradação lenta, como a madeira ou o papel.

Cabe destacar que a dedução das equações apresentadas a seguir não foi apresentada nas metodologias.

3.1 METODOLOGIA DE CÁLCULO DA USEPA

A USEPA apresenta duas metodologias para calcular os gases emitidos pela degradação de Resíduos Sólidos em aterros: uma destinada a sistemas de disposição sem controle, ou seja, em vazadouros ou lixões e a outra destinada ao cálculo das emissões em sistemas de disposição controlada.

3.1.1 Sem Sistema de Controle

Para o tipo de disposição sem controle é apresentada a equação cinética de primeira ordem (1) com a qual podem ser calculadas as emissões de metano. Esta metodologia foi publicada pela USEPA ("Emission factor documentation for AP-42 section 2.4. Municipal Solid Waste Landfills") e tem como base a estimativa direta das emissões de metano a partir de um modelo (Land-Gem: Landfill Gas Emission Model) :

$$Q_{CH4} = L_0 \times R \times \left(e^{-k.c} - e^{-kt}\right) \quad (1)$$

Em que:

QCH_4 = Metano gerado no ano t, (m^3/ano).
L_0 = Potencial de geração de metano por tonelada de resíduo depositado, (m^3 CH_4 / t resíduo).
R = Média anual de entrada de lixo no vazadouro, (t/ano).
k = taxa de geração de metano, (ano^{-1}).
c = anos desde o fechamento, c=0 para os ativos, (ano).
t = anos desde o inicio da atividade, (ano).

Na Tabela 3.1 são apresentados os valores que, na ausência de dados, são propostos pela EPA para os coeficientes k e L_0.

TABELA 3.1 - VALORES DE k e L_0 PROPOSTOS PELA USEPA

PLUVIOMETRIA ANUAL	> 635 mm	< 635 mm
k	0,04	0,02
Lo	100 m³/t	100 m³/t

FONTE: USEPA AP. 42,1998

Se não se conhece R, média anual de entrada de lixo, o mesmo pode ser estimado da seguinte forma:

R = Capacidade do vazadouro/nº. anos em funcionamento.
Capacidade = área do vazadouro * altura da pilha * densidade do lixo.

Se a densidade do resíduo não for conhecida, ela pode ser estimada, utilizando a Tabela 3.2.

TABELA 3.2 - ESTIMAÇÃO DA DENSIDADE DO LIXO DEPOSITADO

TIPO DE COMPACTAÇÃO	DENSIDADE ((kg/m³)
LIXO COMPACTADO	635 - 831 (MÉDIA 742)
LIXO DEGRADADO COMPACTADO	1.009 - 1.127 (MÉDIA 1.068)
SEM DADOS	688

FONTE: USEPA 1.997

A equação (1) foi concebida inicialmente para estimar a geração de metano e não para estimar emissões, pois parte do metano em sua migração para a atmosfera é captado e degradado nas camadas mais superficiais do terreno. Entretanto, dada a dificuldade em avaliar as emissões, adotando um critério conservador, considera-se que todo o metano gerado é emitido à atmosfera através de fissuras ou vias de evacuação praticadas no terreno.

Conhecendo-se os percentuais em volume de metano e dióxido de carbono, que são os componentes principais do biogás, pode-se estimar o dióxido de carbono emitido à atmosfera.

A emissão de CO_2 será calculada pela seguinte equação:

$$Q_{CO2} = Q_{CH4} * (\%(V)CO_2 / \%(V)CH_4) \qquad (2)$$

3.1.2 Com Sistema de Controle

Supondo que exista no aterro um sistema de captação do biogás para sua posterior queima ou aproveitamento para a produção de energia elétrica através de motores de combustão interna ou turbinas, devem ser levados em conta os seguintes aspectos:

- Eficiência do sistema de captação. Os sistemas de captação não são 100% efetivos, desta forma, parte do biogás gerado é emitido à atmosfera diretamente. Se este dado for desconhecido será utilizado o valor que sugere a USEPA (1998) de 75% de eficácia de captação.

- Dispositivos de controle. Deve ser levado em conta o dispositivo de controle e/ou aproveitamento do gás do aterro. Na Tabela 3.3 é apresentada a eficiência dos diferentes sistemas de controle em função do dispositivo utilizado.

TABELA 3.3. EFICIÊNCIA DO SISTEMA DE CONTROLE (η cont.)

DISPOSITIVO DE CONTROLE	CONTAMINANTE	η cont(%)	QUALIDADE DO FATOR (*)
QUEIMADOR	VOC	99,2	B
MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	VOC	97,2	E
CALDEIRAS	VOC	98,0	D
TURBINAS DE GÁS	VOC	94,4	E

FONTE: USEPA, 1998
(*) Ver Tabela 3.4

Para estimar as emissões no caso em que existam dispositivos de controle e sempre que não se disponham de dados e/ou medições da própria instalação procede-se da seguinte forma:

- Emissões de CH_4 :

$$CM_{CH4} = \left(Q_{CH4} * \left(1 - \eta col/100\right)\right) + \left(Q_{CH4} * \eta col/100 * \left(1 - \eta cont/100\right)\right) \quad (3)$$

Em que:

CM_{CH4}= emissões controladas de metano, (m³/ano).

Q_{CH4}= emissões não controladas de metano obtidas com a equação (1), (m³/ano).

η col = Eficiência do sistema de captação, 75%, valor sugerido.

η cont= Eficiência do dispositivo de controle, ver Tabela 3.3

- Emissões de CO_2 :

$$CM_{CO2} = Q_{CO2} + \left(Q_{CH4} \eta col/100 * 2{,}75\right) \quad (4)$$

Em que:

CM_{CO2}= emissões controladas de CO_2, (m³/ano).

Q_{CO2}= emissões não controladas de CO_2 obtidas com a equação (2), (m³/ano).

η col = Eficiência do sistema de captação, 75% , valor sugerido.

2,75= razão do peso molecular de CO_2 e CH_4.

Na Tabela 3.4 é apresentada a classificação do tipo de fator e qualidade que ele representa.

TABELA 3.4. CÓDIGOS DE QUALIDADE DOS FATORES DE EMISSÃO

TIPO DE FATOR	QUALIDADE DO FATOR
A	EXCELENTE
B	MÉDIO - ALTO
C	MÉDIO - ALTO
D	MÉDIO - BAIXO
E	BAIXO

FONTE: AP 42, SEÇÃO 11.3. RELATÓRIO FINAL

3.2 METODOLOGIA UTILIZADA PELO BANCO MUNDIAL

O Banco Mundial apresenta no Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe (2003) o Modelo Scholl Canyon que é também um modelo cinético de primeira ordem com base na premissa de que há uma fração constante de material biodegradável no aterro por unidade de tempo.

Segundo o Manual citado anteriormente, o modelo foi selecionado por ser o mais comumente empregado e aceito nas Américas do Sul e do Norte e por sua forma simples de compreender e aplicar. O modelo é representado pela equação (5) apresentada abaixo :

$$Q_{(CH4)i} = k \times L_0 \times m_i \times e^{-k.t} \quad (5)$$

Em que:

$Q_{(CH4)i}$ = Metano produzido no ano i a partir da seção i do resíduo, (m³/ano);
k = Taxa da geração de metano, (anos^{-1});
L_0 = Potencial da geração de metano, (m³ CH_4 / t resíduo);
m_i = Massa de resíduo despejada no ano i, (t/ano);
t_i = Anos após o fechamento.

Os valores sugeridos para a constante de geração de metano (k) estão apresentados na Tabela 3.5.

TABELA 3.5 - VALORES PARA K PROPOSTOS EM CORRESPONDÊNCIA COM A PRECIPITAÇÃO ANUAL

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

FONTE: Banco Mundial, (2003)

O potencial de geração de metano (L_0) representa sua produção total por tonelada de lixo. Valores típicos para este parâmetro variam de 125 m³ a 300 m³ de metano/tonelada de resíduo.

O Manual do Banco Mundial propõe a utilização de um valor pré-estabelecido de L_0 de 170 m³ de metano/tonelada de resíduos, conforme a Tabela 3.6.

TABELA 3.6- VALORES L_0 EM FUNÇÃO DA DEGRADABILIDADE DO RESÍDUO

Categorização do Lixo	Valor Mínimo para Lo	Valor Máximo para Lo
Lixo Relativamente Inerte	5	25
Lixo Moderadamente Degradável	140	200
Lixo Altamente Degradável	225	300

FONTE: BANCO MUNDIAL, (2003)

A equação (5) não fornece uma representação adequada de aterros de RSU ativos, já que neste caso a exponencial da equação assume o valor um, o que fornece para aterros sem grandes flutuações no ingresso anual de resíduos uma geração constante de metano, independente do tempo de atividade do aterro.

3.3 METODOLOGIA IPCC

As diretrizes do IPCC – Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas – (1996), descrevem dois métodos para estimar as emissões de metano procedentes de aterros: o método simplificado, que tem como base a suposição de que o total de metano potencial se libera durante o ano em que se produz a disposição dos resíduos, equação (6), e o método de decomposição de primeira ordem, equações (7) e (8). O método de decomposição de primeira ordem gera um perfil de emissões que depende do tempo transcorrido e que reflete melhor as verdadeiras pautas do processo de degradação ao longo do tempo.

$$CH_4(t/ano) = \left(RSU_T * RSU_F * L_0 - R(t)\right) * \left(1 - OX\right) \qquad (6)$$

$$CH_4 gerado\left(t/ano\right) = \sum \left[\left(A * k * RSU_T(x) * RSU_F(x) * L_0(x)\right) * e^{-k(t-x)}\right] \qquad (7)$$

$$CH_4 emitido\left(t/ano\right) = \left[CH_4 gerado - R(t)\right] * \left(1 - OX\right) \qquad (8)$$

Em que:

t = ano de realização do inventario.
x = ano de contribuição (desde inicio de atividade até t).
A = $(1-e^{-k})/k$; fator de normalização para corrigir a soma.
k = constante de geração, ano^{-1}.
$RSU_T(x)$ = total de RSU gerados no ano x, t/ano.
$RSU_F(x)$ = fração de RSU depositada no aterro no ano x.
$RSU_T(x) * RSU_F(x)$ = massa de resíduos despejada no ano x, t/ano
L_0 = potencial de geração de metano (t CH_4/t RSU);
$L_0 = FCM(x)*COD(x)*COD_F*F*16/12$.
FCM(x) = fator de correção do metano no ano x.
COD(x) = fração de carbono orgânico degradável no ano x (t C/t RSU).
COD_F = fração do carbono orgânico degradável assimilado.
F = fração de metano no gás do aterro, na ausência de dados 0,5.
16/12 = conversão de carbono a metano.
R(t) = quantidade de metano recuperada no ano t.
OX = fator de oxidação (fração).

A equação (7) não fornece uma representação adequada de aterros de RSU fechados, já que a fração exponencial é sempre crescente, o que gera um aumento constante na geração de biogás. Se por outro lado for considerado o ingresso de resíduos ao aterro como zero, a equação é zerada.

3.3.1 Determinação do Fator de Correção para o Metano

O IPCC (1996 a), no documento guia para a realização de inventários de gases de efeito estufa, propõe valores do FCM em função do tipo de aterro onde se realize a

eliminação dos RSU. Classifica os vazadouros em duas categorias, controlados e não controlados, e designa um valor do FCM a cada um deles.

Aos aterros controlados designa um valor do FCM de 1. O IPCC define como aterros controlados aqueles nos quais existe uma deposição controlada dos resíduos, ou seja, áreas específicas para depositar os resíduos e certo grau de controle da coleta do lixo. Ainda, deverá ser utilizado pelo menos um dos seguintes procedimentos: material de cobertura, compactação mecânica ou nivelamento de desperdícios.

Para aterros não controlados, denominados vazadouros ou lixões, os valores de FCM que o IPCC in CETESB (2002) recomenda variam com a altura da pilha de disposição, como indicado na Tabela 3.7.

TABELA 3.7 – FCM RECOMENDADO PELO IPCC

LDRS	FCM
Altura maior ou igual a 5 m	80%
Altura menor que 5m	40%
Locais sem classificação	60%

FONTE:CETESB, (2002)

3.3.2 Constante de Geração

A constante de geração, k, representa a velocidade de degradação da matéria orgânica. Se este parâmetro não estiver caracterizado o IPCC recomenda um valor de 0,05.

3.3.3 Carbono Orgânico Degradável (COD)

O carbono orgânico degradável é a fração acessível para a decomposição bioquímica dos resíduos. A Tabela 3.8 mostra os valores recomendados pelo IPCC para os diferentes resíduos.

TABELA 3.8 - VALORES RECOMENDADOS PARA O COD NOS PRINCIPAIS TIPOS DE RESÍDUOS.

COMPONENTE	PORCENTAGEM DE COD EM MASSA
A. PAPEL, PAPELÃO E TECIDOS	40
B. RESÍDUOS DE PARQUES E JARDINS	17
C. RESTOS DE ALIMENTOS	15
D. MADEIRA	30

FONTE: IPCC (1996)

Para o cálculo do COD é proposta a seguinte equação:

COD (fração)= 0,4 A+0,17 B+0,15 C+0,30 D

Em que:

A: Fração dos RSU que corresponde ao papel e aos têxteis.

B: Fração dos RSU que corresponde aos resíduos de jardins e parques e outros resíduos orgânicos putrescíveis (excluídos os alimentos).

C: Fração dos resíduos que correspondem a restos de alimentos.

D: Fração dos resíduos que correspondem aos resíduos de madeira e palha.

Caso não sejam conhecidas as frações dos resíduos o IPCC recomenda um valor de 12% para o COD.

3.3.4 Fração do Carbono Orgânico Degradável Assimilado COD_F

O COD_F corresponde à fração do carbono orgânico degradável que realmente se degrada. O carbono orgânico degradável não se decompõe totalmente e parte permanece no aterro inclusive durante longos períodos de tempo. Na ausência de dados o IPCC propõe um valor de 77% para o COD_F.

3.3.5 Fator de Oxidação OX

O fator de oxidação reflete a quantidade de metano procedente dos aterros que se oxida no solo ou em outros materiais que cobrem os resíduos. Estudos realizados

demonstram que os aterros sanitários tendem a expressar resultados de oxidação mais altos que os lixões. Até o presente momento não existem valores aceitos internacionalmente e, na ausência de dados, se assume um valor igual a 0.

O uso de valores de Oxidação diferentes de zero é justificado no caso de aterros sanitários mas, em outros casos, o uso de um valor de oxidação diferente de zero deve estar claramente documentado e respaldado por referências. É importante destacar que qualquer quantidade de metano que se recupere deverá descontar-se do volume gerado antes de aplicar um fator de oxidação.

3.3.6 Incertezas Associadas

Na Tabela 3.9, é apresentada a faixa de incerteza associada a cada parâmetro.

TABELA 3.9 - INCERTEZA ASSOCIADA AOS PARÂMETROS SUGERIDOS PELO IPCC

PARÂMETRO	FAIXA DE INCERTEZA
MSW * MSW_F	> ± 10%
DOC = 0,21	- 50% , + 20%
DOC_F =0,77	- 30% , 0%
FCM = 1	- 10% , 0%
F = 0,5	- 0% , 20%
RECUPERAÇÃO DE METANO (R)	A faixa de incerteza dependerá da forma em que são estimadas as quantidades de metano recuperado, mas é provável que essa incerteza seja relativamente pequena se comparada com outras quando se aplicam sistemas de medição.
OX	O fator OX deverá ser incluído na análise da incerteza quando tenha sido indicado um valor diferente de zero
TAXA DE GERAÇÃODE METANO k = 0,05	- 40% ,+ 300 %

FONTE: IPCC (1996)

3.4 METODOLOGIA EMPREGADA NA MODELAGEM COM MODUELO 2

O MODUELO 2 é um programa de simulação dinâmica de aterros de resíduos urbanos desenvolvido pelo Grupo de Engenharia Ambiental da Universidade de Cantabria, Espanha.

O programa permite, partindo de dados topográficos, meteorológicos, de caracterização do resíduo depositado e do tipo de exploração do aterro, estimar a contaminação emitida no lixiviado e como biogás. Para tal, criou-se uma representação tridimensional do aterro discretizando em camadas formadas por células quadradas, sobre as quais se reproduz o histórico da disposição dos resíduos. O modelo é estruturado em dois módulos principais: o "hidrológico" e o da "degradação" do resíduo. O primeiro calcula horariamente o balanço hídrico, a transferência de umidade entre as células e a quantidade de água que chega até os drenos de lixiviado. Como resultado estima o volume diário de lixiviado e estabelece as condições de umidade em cada célula, que servem como dado ao módulo de degradação. Neste módulo calcula-se a contaminação produzida pela biodegradação da matéria orgânica do resíduo. Seus resultados são as cargas de contaminantes orgânicos biodegradáveis e não biodegradáveis no lixiviado, as concentrações de DQO e DBO, e o volume e composição do biogás gerado diariamente, Lobo (2003).

3.4.1 Dados de Entrada

Os dados de entrada, necessários para a realização das simulações, são divididos em quatro blocos independentes:

- Produção de R.S.U., com todos os parâmetros que caracterizam os resíduos que chegam ao aterro, como toneladas totais anuais, composição relativa, umidade, densidade, etc.
- Morfologia do aterro, com todos os parâmetros referentes à disposição geométrica, topografia da área, locação das células, ordem de disposição dos resíduos e características de discretização, como dimensões horizontais das células, espessura, tipologia das células, situação dos drenos, etc.

- Climatologia, onde são armazenadas as series temporais das variáveis climatológicas como umidade relativa do ar, precipitação, radiação solar, temperatura do ar e velocidade do vento.

- Parâmetros de simulação, que contêm tanto os que governam os modelos teóricos utilizados (permeabilidade, parâmetros de Horton, etc.) como aqueles que controlam a simulação propriamente dita (data de inicio e de fechamento, discretização temporal, raio de influência dos drenos, etc.).

Os três primeiros conjuntos podem ser denominados “parâmetros reais” e neles são resumidos todos os parâmetros físicos que o modelo precisa para simular o comportamento do aterro. O quarto bloco se refere aos “parâmetros de simulação” que permitem ajustar os valores calculados aos obtidos nas medições reais.

A Figura 3.1 mostra a tela de abertura do programa, que é o ponto de partida para a modelagem.

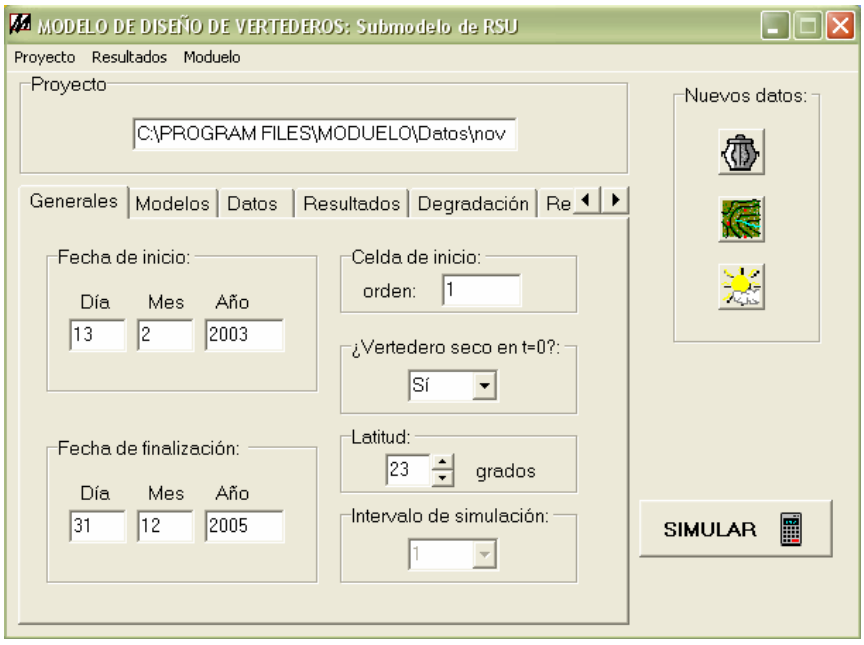


FIGURA 3.1 – TELA INICIAL DA MODELAGEM UTILIZANDO MODUELO 2

As informações de produção, onde é especificado o número de habitantes atendidos pela coleta, a geração de resíduos e a taxa de crescimento populacional, são adicionadas na tela de produção mostrada abaixo, Figura 3.2.

FIGURA 3.2 – TELA DE INSERÇÃO DE DADOS DE PRODUÇÃO

Na opção Classificação é introduzida a caracterização gravimétrica dos resíduos, como mostrado na Figura 3.3 abaixo.

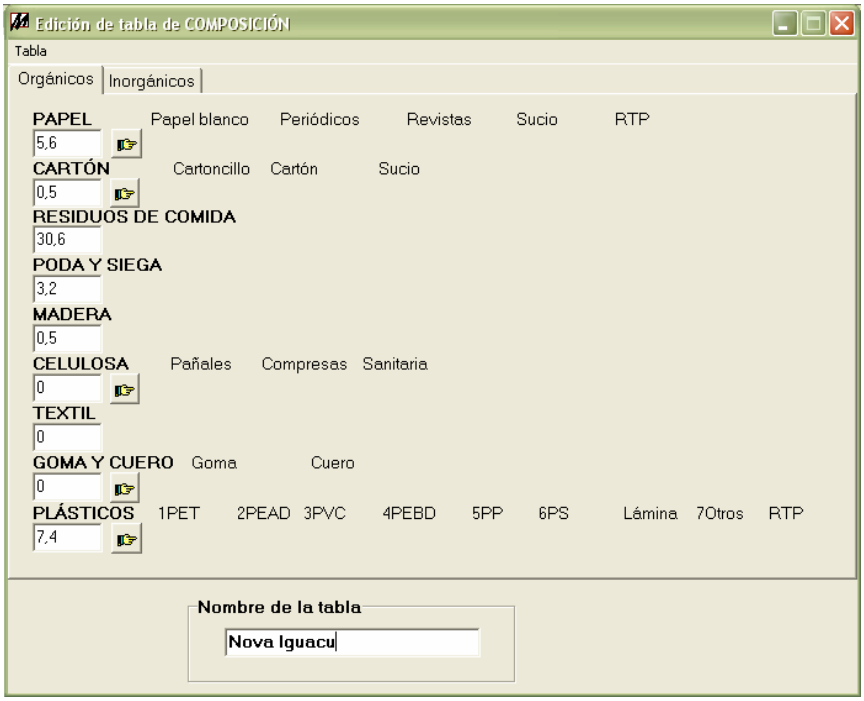


FIGURA 3.3 – TELA DE EDIÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA

Além desses dados, são informados dados sobre a composição da fração orgânica dos resíduos e sobre a prática ou não de reciclagem.

A Figura 3.4 mostra a base do aterro, gerada pelo modelo, após a introdução dos dados da topografia local e o tamanho das células a serem dispostas. Nesta base serão inseridas manualmente as células ocupadas pela drenagem e as células ocupadas pelos resíduos.

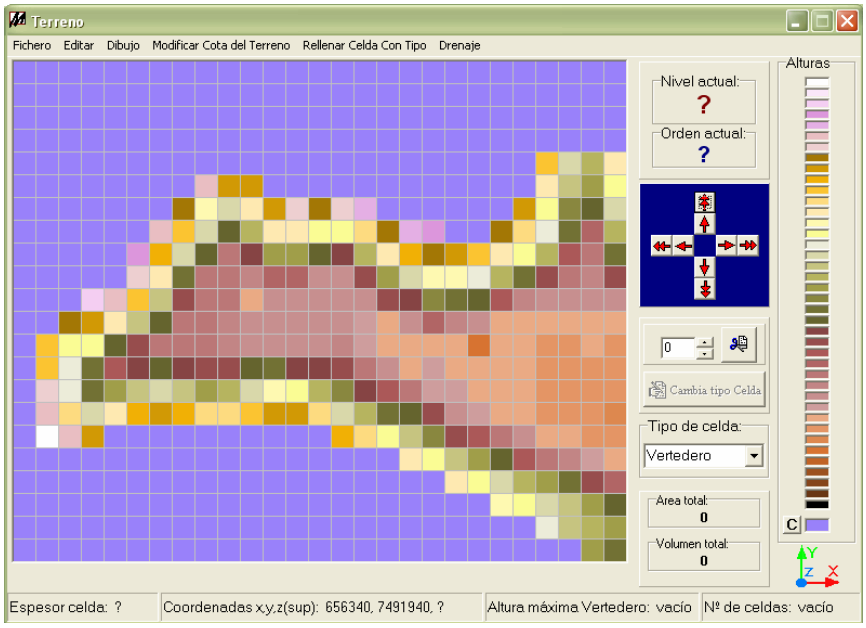


FIGURA 3.4 – TERRENO DE BASE DIVIDIDO EM CÉLULAS

Após a introdução das células correspondentes à drenagem e aos resíduos, ainda na fase de introdução dos dados morfológicos, são informadas as características das células avaliadas, como Parâmetros de Horton, que descrevem a evolução do volume de água infiltrado em função do tempo de infiltração, capacidade de campo e permeabilidade vertical e horizontal das células, representadas na Figura 3.4.

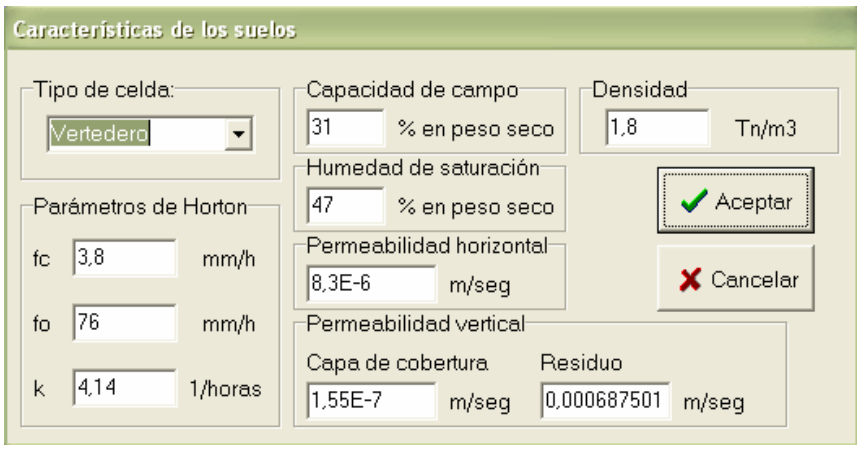


FIGURA 3.5 - INSERÇÃO DOS PARAMETROS DAS CÉLULAS

3.4.2 Módulo de Biodegradação

No trabalho aqui apresentado daremos ênfase à descrição do módulo de biodegradação, que permite a obtenção do volume e composição do biogás produzido no aterro.

O modelo de biodegradação está centrado nos processos que afetam os compostos orgânicos dos resíduos. A matéria orgânica está composta por duas frações sendo uma biodegradável e outra não biodegradável. Por sua vez a fração biodegradável é constituída por uma parte rapidamente hidrolisável e outra lentamente hidrolisável.

Conhecendo a massa de cada componente que chega ao aterro pode-se estimar sua biodegradabilidade a partir de estudos do potencial bioquímico de metano (PBM), nos quais é obtida a quantidade de metano que pode ser gerado a partir da degradação completa, em condições de laboratório, do resíduo estudado.

A relação PBM observado (experimentalmente)/PBM (teórico) de cada componente é o fator “f bio” que quando aplicado à massa total de resíduos que chega ao aterro, fornece a fração que poderia degradar-se (fração biodegradável ou gaseificável) em condições ideais.

A Tabela 3.10 apresenta a classificação proposta no Moduelo para a biodegradabilidade dos principais componentes do resíduo.

TABELA 3.10 CLASSIFICAÇÃO PROPOSTA NO MODUELO PARA OS PRINCIPAIS COMPONENTES DO RESÍDUO SEGUNDO SUA BIODEGRADABILIDADE.

RÁPIDAMENTE BIODEGRADÁVEIS	LENTAMENTE BIODEGRADÁVEIS	INERTES
Papel	Madeira	Plásticos
Papelão	Têxteis	Vidro
Resíduos de comida	Borracha e couro	Metais
	Resíduos de poda e capina	Outros inorgânicos
	Materiais celulósicos	

FONTE: LOBO (2003)

À massa “gaseificável” são acrescentadas as substâncias que não sendo degradáveis pelos microorganismos, podem ser carreadas pelo efeito da hidrólise dos componentes em seu entorno ou como conseqüência direta de processos físico químicos como carreamento com a água na sua percolação e/ou dissolução química.

Os compostos orgânicos não biodegradáveis que aparecem no lixiviado, incluído no programa através do “factor de arrastre”, fator de carreamento, de forma que este fator, entre 0 e 1, determina a fração da matéria orgânica inerte que irá passando ao lixiviado.

Outro fator presente no programa é o de “acessibilidade” que expressa a parte da fração biodegradável que será dissolvida no aterro. Este fator que indica a “fração degradável accessível”, aplicado à massa degradável em condições ideais, expressa a parte da mesma que será realmente hidrolisada nas condições específicas do aterro estudado. O fator de acessibilidade varia de 0 (os microrganismos não têm acesso a nenhuma fração do resíduo) a 1, situação ideal em que toda matéria degradável será decomposta.

3.4.2.1 Degradação Bioquímica

Para simular o aparecimento sucessivo de matéria contaminante no lixiviado e de biogás são consideradas três etapas descritas a seguir.

- **Hidrólise**

A hidrólise representa a passagem da matéria sólida ao lixiviado através da degradação biológica dos compostos orgânicos ou pelo carreamento químico ou físico. São distinguidas duas reações segundo o tipo de matéria que sofra o processo: biodegradável ou não biodegradável.

A fração do carbono que é convertida em acetato nas etapas de hidrólise e fermentação é denominada “f_{AC}” e a fração de carbono convertida em compostos intermediários é denominada como f_{CHO}, portanto (1- f_{AC} - f_{CHO}) será a proporção que gera CO_2 nesta fase.

Os valores sugeridos pelo modelo são os apresentados por Zhender et al (1982) para ecossistemas anaeróbios que indicam que cada mol de carbono ao se decompor gera aproximadamente 0,76 mol de carbono na forma de compostos intermediários e 0,20 mol de carbono na forma de acetato Apud, Lobo (2003).

- **Acetogênese**

Consiste na transformação dos “produtos intermediários” em acetato, dióxido de carbono e hidrogênio. A proporção de carbono dos compostos intermediários que se transforma em acetato se denomina “f $'_{AC}$”. O valor sugerido pelo programa para f $'_{AC}$ é o sugerido por Zhender et al (1982) de 0,68 Apud, LOBO, 2003.

- **Gaseificação**

O processo final de decomposição transforma a matéria em biogás e por esse motivo é denominada “gasificação”. A geração do metano em sistemas biológicos é produzido por duas vias: pela utilização do acetato (metanógenos acetófilos) e pela redução do CO_2 com H_2 (metanógenos hidrogenófilos). Neste modelo são propostas duas transformações independentes uma para cada processo de geração de metano. Nas Tabelas 3.11 e 3.12 são apresentadas as reações de degradação utilizadas no programa para as etapas de hidrólise, acetogênese e metanogênese.

TABELA 3.11 REAÇÕES DE DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO MODUELO 2 - HIDRÓLISE

Nº	DESCRIÇÃO	TRANSFORMAÇÃO	VELOCIDADE
1	Hidrólise do material rapidamente hidrolisável biodegradável	$Cc_{rhb}Hh_{rhb}Oo_{rhb}Nn_{rhb}Ss_{rhb} \rightarrow f_{CHO}.c_{rhb}.C_{CHO} + e_{rhb}.H_{CHO} + [o_{rhb} + (-2 + 2.f_{CHO} + f_{AC}).c_{rhb}].O_{CHO}$ $f_{AC}.c_{rhb}.CH_3COOH + (1 - f_{AC} - f_{CHO}).c_{rhb}.CO_2 +$ $a_{rhb}.H_2 + n_{rhb}NH_3 + s_{rhb}SH_2$	$kh_r.MS_{rhb}$
2	Hidrólise do material lentamente hidrolisável biodegradável	$Cc_{lhb}Hh_{lhb}Oo_{lhb}Nn_{lhb}Ss_{lhb} \rightarrow f_{CHO}.c_{lhb}.C_{CHO} + e_{lhb}.H_{CHO} + [o_{lhb} + (-2 + 2.f_{CHO} + f_{AC}).c_{lhb}].O_{CHO}$ $f_{AC}.c_{lhb}.CH_3COOH + (1 - f_{AC} - f_{CHO}).c_{lhb}.CO_2 +$ $a_{lhb}.H_2 + n_{lhb}NH_3 + s_{lhb}SH_2$	$kh_1.MS_{lhb}$
3	Carreamento do material não biodegradável na hidrólise rápida	$Cc_{rhnb}Hh_{rhnb}Oo_{rhnb}Nn_{rhnb}Ss_{rhnb} \rightarrow Cc_{nb}Hh_{nb}Oo_{nb}Nn_{nb}Ss_{nb}$ (dissolvidos)	$f_{ar}.kh_r.MS_{rhb}$
4	Carreamento do material não biodegradável na hidrólise lenta	$Cc_{lhnb}Hh_{lhnb}Oo_{lhnb}Nn_{lhnb}Ss_{lhnb} \rightarrow Cc_{nb}Hh_{nb}Oo_{nb}Nn_{nb}Ss_{nb}$ (dissolvidos)	$f_{ar}.kh_1.MS_{lhb}$

(1) $e_{hb} = 2.f_{CHO}.c_{hb}$ se $h_{hb} > 2.(f_{AC} + f_{CHO}).c_{hb} + 3.n_{hb} + 2.s_{hb}$; $e_{hb} = h_{hb} - 2.f_{AC}.c_{hb} - 3.n_{hb} - 2.s_{hb}$ se $h_{hb} \leq 2.(f_{AC} + f_{CHO}).c_{hb} + 3.n_{hb} + 2.s_{hb}$

(2) $a_{hb} = \frac{h_{hb} - 2.(f_{AC} + f_{CHO}).c_{hb} - 3.n_{hb} - 2.s_{hb}}{2}$ se $h_{hb} > 2.(f_{AC} + f_{CHO}).c_{hb} + 3.n_{hb} + 2.s_{hb}$ e $a_{hb} = 0$ se $h_{hb} \leq 2.(f_{AC} + f_{CHO}).c_{hb} + 3.n_{hb} + 2.s_{hb}$

TABELA 3.12 - REAÇÕES DE DEGRADAÇÃO DOS RESÍDUOS SEGUNDO MODUELO 2 - ACETOGÊNESE E METANOGÊNESE

Nº	DESCRIÇÃO	TRANSFORMAÇÃO	VELOCIDADE
5	Acetogênese	$C_{CHO}H_{CHO}O_{CHO} + [(2 - f'_{AC}).C_{CHO} - O_{CHO}].H_2O \rightarrow \frac{f'_{AC}}{2}.C_{CHO}.CH_3COOH + (1 - f'_{AC}).C_{CHO}.CO_2 + \frac{+4.(1 - f'_{AC}).C_{CHO} + H_{CHO} - 2.O_{CHO}}{2}.H_2$	k_A.CHO
6	Metanogênese	$CH_3COOH \rightarrow CH_4 + CO_2$	k_{AC}.AC
7	Metanogênese hidrogenofílica	$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$	$k_{H2}.H_2$

Em que:

MS_{rhb}: matéria orgânica rapidamente hidrolisável

MS_{lhb}: matéria orgânica lentamente hidrolisável

Kh_r: máxima velocidade de hidrólise rápida (d^{-1})

Kh_l: máxima velocidade de hidrólise lenta (d^{-1})

f_{ar}: fator de carreamento

k_A: taxa de acetogênese (d^{-1}), velocidade de decomposição dos "compostos orgânicos intermediários"

k_{AC}: velocidade de produção do metano a partir do acetato (d^{-1})

kH_2: velocidade de produção do metano a partir do hidrogênio (d^{-1})

Na Tabela 3.13 estão reunidas as taxas de degradação apresentadas por diversos autores.

O modelo também utiliza o conceito de tempo de ativação, que está relacionado ao atraso que ocorre nos processos de degradação em relação a uma situação ideal, em que os sólidos estão totalmente envoltos por água e microorganismos. Este atraso inicial é incrementado pelo período de adaptação que os microorganismos precisam para adaptar-se ao novo substrato.

TABELA 3.13 – VALORES DAS TAXAS DE DEGRADAÇÃO DO RESÍDUO RESULTANTES DA CALIBRAÇÃO DE MODELOS DE OUTROS AUTORES

REFERÊNCIA	LIBERAÇÃO DE SÓLIDOS - HIDRÓLISE	ÁCIDO - ACETOGÊNESE	GASIFICAÇÃO - METANOGÊNESE
Lee et al. 1993	0,0008	Não especificadas	
El-Fadel et al. (1996c e1996b)	Rápida: 0,006 - 0,000002 Média: 0,001 - 0,0000003 Lenta: 0,0002 - 0,0000006	0,0002 - 0,003	0,00007 - 0,001
Manna et al. (1999)	Rápida: 0,00063 - 0,00189 Lenta: 0,00008 - 0,00016	Somente uma etapa	
Young, 1995	Rápida: 0,00274 Média: 0,000548 Lenta: 0,00000113	0,6912-(Acidogênese) 0,0024-(Acetogênese)	0,6-(Acetoclástica) 9300 (Hidrogenofílica)
Zacharof e Butler, 2000	0,0027 - 0,0055		
Haarstric et al. 2001	Rápida: 35 - 250 Lenta: 2,5 - 12,5	80 - 1196	
Lee et al., 2001	0,00375 - 0,002	Duas etapas	0,816

FONTE: Lobo, 2003

CAPÍTULO 4 - ESTUDO DE CASO

4.1 DESCRIÇÃO DO MUNICÍPIO

O município de Nova Iguaçu está localizado na região da Baixada Fluminense no Estado do Rio de Janeiro.

Atualmente Nova Iguaçu é um dos municípios mais populosos do Rio de Janeiro, ultrapassando os 800 mil habitantes.

Com uma área de 520,5 km², Nova Iguaçu apresenta uma densidade demográfica bruta de 1441,9 hab/km², revelando-se o 4º município mais populoso da Região Metropolitana. A Figura 4.1 indica a localização do Município de Nova Iguaçu.

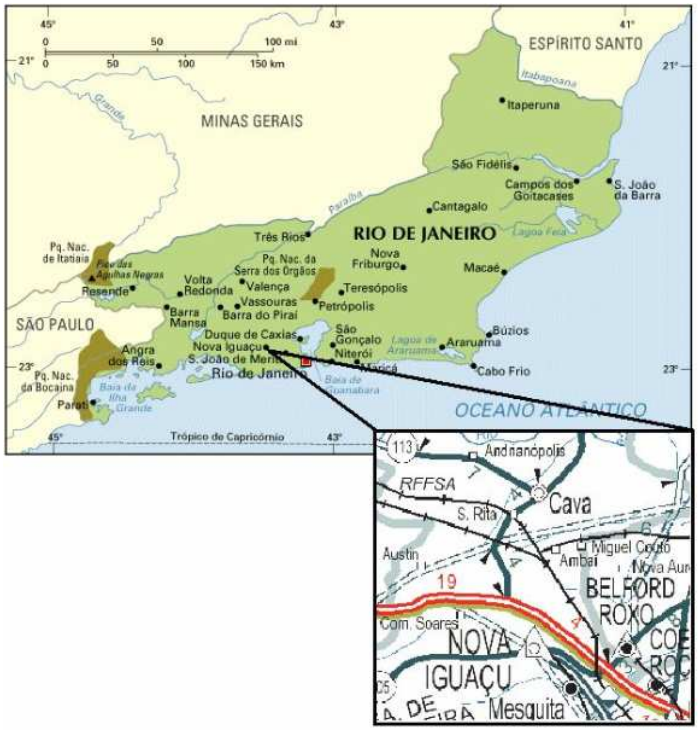


FIGURA 4.1 – LOCALIZAÇÃO DO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU -RJ

O clima é tropical úmido, com concentração de chuvas nos meses mais quentes (novembro a fevereiro). Junto à Serra de Tinguá, o índice pluviométrico pode

ultrapassar 70% em relação ao restante do município. As temperaturas médias anuais giram em torno de 25,8°C .

O município conta com diversos rios, córregos e canais, que constituem duas bacias: a dos rios Iguaçu e Sarapuí, que se projetam na Baía de Guanabara e a do rio Guandu, que desemboca na Baía de Sepetiba, formada pela confluência dos rios Santana e Ribeirão das Lajes. Possui 50% de sua superfície coberta por vegetações, totalizando 10 Unidades de Conservação Ambiental, sendo que, desse total, cerca de 30% correspondem à Mata Atlântica.

A exemplo do que ocorre em todos os demais municípios da Baixada Fluminense, Nova Iguaçu padece de sérias carências em infra-estrutura urbana, principalmente no que diz respeito ao saneamento básico, compreendendo-se aí a rede de esgoto, o abastecimento de água e a drenagem.

Dentre as diversas atividades industriais desenvolvidas na cidade, destaca-se a produção de cosméticos, sendo a segunda maior produtora deste gênero no Brasil.

4.2 A LIMPEZA URBANA NO MUNICÍPIO

Desde o final da década de 80 até fevereiro de 2003 os resíduos gerados no Município de Nova Iguaçu vinham sendo depositados no lixão da Marambaia, que está localizado no distrito de Vila de Cava, ao leste do município, próximo a Duque de Caxias.

No dia 12 de fevereiro de 2003 o lixão , que ocupava uma área aproximada de 200.000 m² e recebia diariamente cerca de 1000t de resíduos, foi desativado. Sendo os resíduos encaminhados à Central de Tratamento de Resíduos – CTR Nova Iguaçu.

Atualmente a área do antigo lixão encontra-se retaludada, e coberta por uma camada de argila compactada. Também foi implementado um sistema de drenagem de águas superficiais e de percolado, sendo este último encaminhado a uma lagoa de acumulação e posteriormente recirculado.

Em Nova Iguaçu a coleta de resíduos é efetuada pela Empresa Municipal de Limpeza Urbana (Emlurb).

A cidade dispõe de uma cobertura de coleta de 85%, uma vez que possui uma parcela razoável de áreas rurais e 62% de ruas não-pavimentadas. A geração de resíduos por habitante é de 0,6 kg por dia, sendo o cálculo apresentado no Anexo 1.

A coleta domiciliar é realizada 3 vezes por semana no horário de 7:00 às 16:20 h, exceto no centro da cidade onde é realizada coleta noturna diariamente.

Existem 54 Estabelecimentos de Saúde cadastrados, que geram 3t de resíduo por dia. Estes eram depositados até 2003 no Aterro Metropolitano de Gramacho, em Duque de Caxias, quando passaram a ser processados na CTR Nova Iguaçu.

4.3 A CENTRAL DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE NOVA IGUAÇU

Depois de quase 20 anos depositando seus resíduos no Lixão da Marambaia a cidade de Nova Iguaçu passou a ter sua própria Central de Tratamento de Resíduos-CTR Nova Iguaçu.

A instalação e operação da CTR Nova Iguaçu foi concedida à empresa S.A. Paulista por um período de 20 anos. A CTR esta localizada a 10km do centro urbano, no distrito de Vila da Cava na estrada de Andrianópolis nº 5213. O empreendimento abrange uma área de 120 ha, onde serão implantados quatro locais de disposição de resíduos, como ilustrado na Figura 4.2. O aterro foi projetado para receber resíduos domiciliares e Classe II A[5] .

[5] Resíduos Classe IIA: não inertes, aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classeI – Perigosos ou de resíduos classe IIB – Inertes. Os resíduos classe IIA – Não inerte podem ter propriedades, tais como: bidegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

FIGURA 4.2- ILUSTRAÇÃO DA CONFIGURAÇÃO FINAL DA CTR NOVA IGUAÇU

FONTE: S. A. PAULISTA

A unidade de tratamento de chorume utiliza um sistema que transforma a água existente no chorume em vapor e os materiais precipitados, que são o resíduo deste processo, são jogados posteriormente no aterro sanitário. A energia utilizada para acionar este processo é retirada do aproveitamento do biogás gerado no aterro. A utilização do biogás no evaporador é a primeira fase do processo de aproveitamento do biogás, onde a rede de captação e drenagem de biogás ainda é muito simples.

A unidade de tratamento de RSS consiste num equipamento compacto que tritura os resíduos e utiliza desinfecção térmica contínua. O resíduo resultante pode ser considerado como resíduo comum não infeccioso, podendo ser depositado em qualquer parte do aterro.

Também está prevista a implantação de uma unidade de processamento de RCDs, tendo sido inclusive realizado em 2004 um estudo de campo no aterro utilizando a fração mais grosseira do RCD processado como material de drenagem de chorume (Affonso, 2005). Esta unidade será composta por uma unidade recicladora com alimentador vibratório, separador magnético, sistema de peneiramento e equipamentos como pá carregadeira de pneus, retroescavadeira de pneus e dois caminhões basculantes. Destaca-se a necessidade desta unidade, já que mais de 80% do lixo público de Nova Iguaçu é composto por material de entulho.

4.3.1 Clima

A área do aterro está situada entre as latitudes de 22º 30’ e 23º S no meridiano 43º 00’ W. O local tem ao norte a Serra do Mar, ao sul os maciços da Tijuca e de Jacarepaguá, a leste a baía de Guanabara e a oeste a serra de Madureira.

De acordo com a classificação Koppen, a região apresenta clima subtropical (wa), com inverno seco(w) e verão quente (a), á tropical chuvoso de região de floresta.

Os ventos têm velocidades entre 1 e 4 m/s com direção Este durante o inverno. Nas demais estações predomina o vento sul-sudeste, com velocidade entre 2 e 4 m/s.

A temperatura média anual é de 26 ºC. A taxa de evapotranspiração média anual é de 703 mm e a umidade relativa do ar é de 70%.

Quanto à precipitação pluviométrica, a média anual chega a 1.595 mm, com os maiores valores ocorrendo no período de novembro a fevereiro (meses mais quentes), com médias mensais variando entre 51,4 mm (julho) e 229 mm (janeiro).

Os dados climáticos do período em que foi realizada a avaliação do aterro - fevereiro de 2003 a dezembro de 2005 – foram adquiridos na Fundação GEO-RIO. A estação utilizada foi a Estação de Anchieta, localizada ao norte do Município do Rio de Janeiro, por ser a estação mais próxima operando na região, distando 20km do local de estudo. A Figura 4.3 indica a localização da estação pluviométrica utilizada.

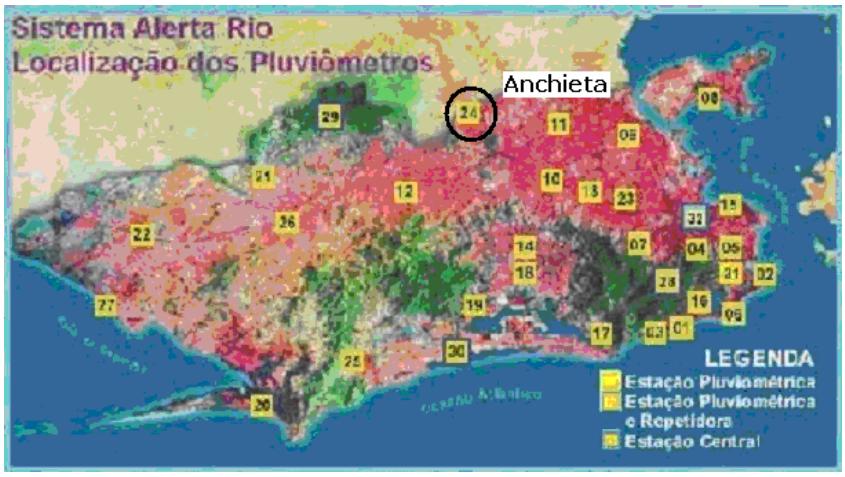


FIGURA 4.3 – LOCALIZAÇÃO DA ESTAÇÃO PLUVIOMÉTRICA DE ANCHIETA

FONTE: FUNDAÇÃO GEO-RIO

4.3.2 Descrição do Aterro

A área atual de disposição dos resíduos abrange 10 hectares. O fundo do aterro possui uma declividade de 2 %, sendo suas cotas inferior e superior de 24m e 36,5 m respectivamente.

No projeto do aterro foi prevista a disposição dos resíduos em células de 5,00m de altura que são conformadas em um dia de trabalho, ocupando uma área aproximada de 225 m². Silveira (2004), realizou ensaios para determinação do peso específico dos resíduos compactados no aterro, obtendo o valor 9,15 kN/m³. Estas células recebem, ao final de cada jornada, uma cobertura de solo de 30 cm de espessura. A disposição de resíduos neste local está prevista até que o aterro atinja uma cota de 65m.

A Figura 4.4, abaixo, apresenta a topografia do terreno conformado para a disposição dos resíduos.

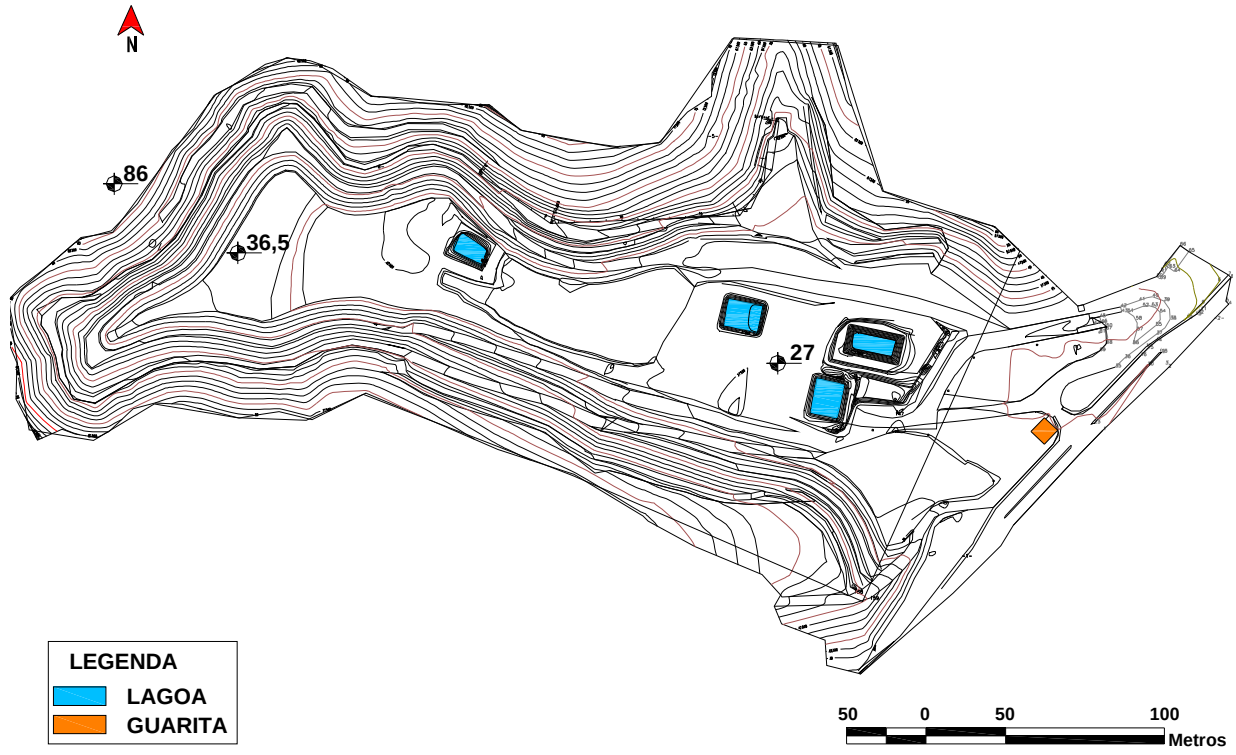


FIGURA 4.4 – TOPOGRAFIA DA BASE DO ATERRO

FONTE: S.A. PAULISTA

Previamente à conformação do terreno da forma apresentada acima foi implantado um sistema de drenagem e canalização das duas nascentes de águas naturais existentes na área de implantação.

O sistema de impermeabilização de fundo consta de camada de solo natural e/ou compactada com permeabilidade inferior a 10^{-9}m/s e espessura mínima de 1,0m, em relação ao nível do lençol freático, e implantação de Geomembrana de Polietileno de Alta Densidade – PEAD de 1,5mm de espessura. Previamente ao lançamento de resíduos, as geomembranas foram protegidas por uma camada mínima de solo de 0,30m.

O aterro possui um sistema para drenagem e coleta de percolados e gases, implantado em todas as camadas, que se conecta à rede de drenagem de fundo, cuja conformação é do tipo espinha de peixe.

- **Drenagem de fundo**

O sistema de drenagem principal de fundo é constituído por tubos de drenagem com diâmetro de 0,40 m, implantados em vala drenante constituída de rachão e brita. O conjunto é envolto por uma manta geotêxtil que possui a finalidade de evitar a colmatação do sistema pela entrada de finos, não impedindo a colmatação biológica ou química.

A linha principal de drenagem apresenta, lateralmente drenos de Rachão formando uma espinha de peixe, espaçados a uma distância máxima de 50m entre si. A drenagem converge para um Poço de Inspeção posicionado no pé do aterro, no qual é realizada a medição periódica de vazão e coleta de amostras do percolado, para avaliação de suas características físicas e químicas ao longo do tempo.

A localização do sistema de drenagem de fundo é apresentada na Figura 4.5.

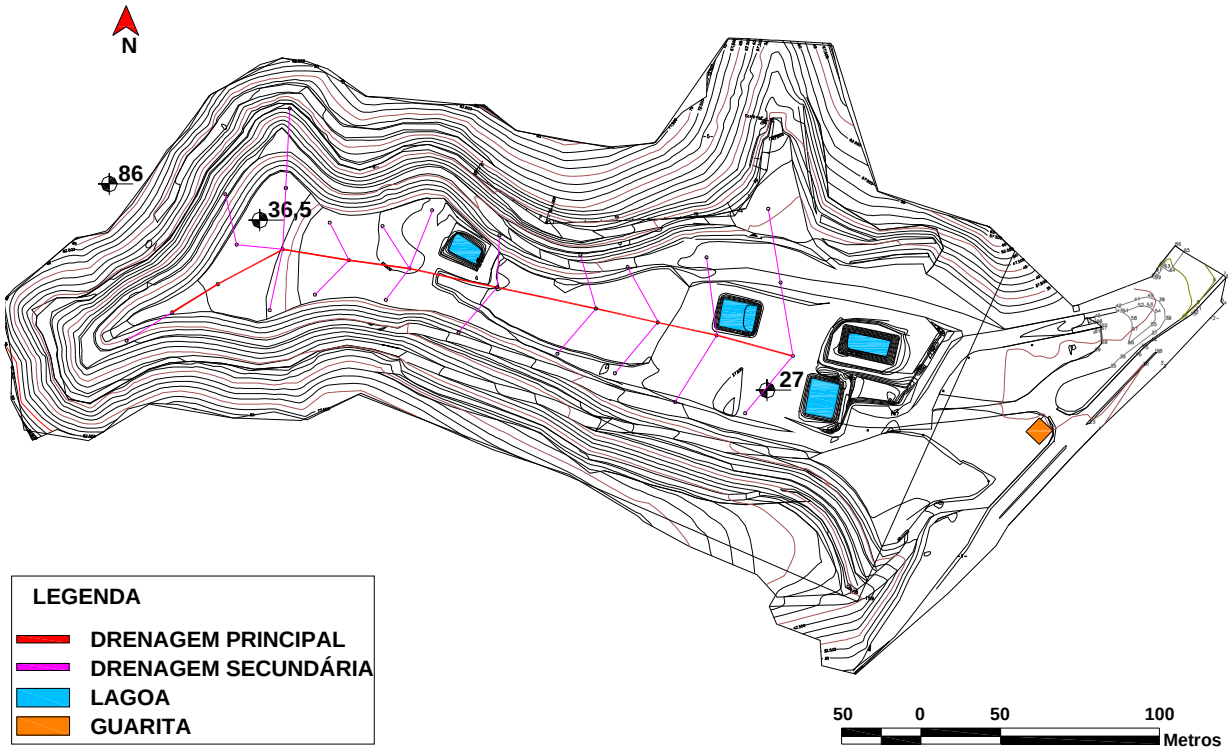


FIGURA 4.5 – PLANTA ESQUEMÁTICA DA REDE DE DRENAGEM DE BASE DO ATERRO

FONTE: S.A. PAULISTA

- **Drenagem Vertical**

A drenagem vertical foi projetada de forma a permitir o escoamento dos gases para a atmosfera, bem como conduzir o percolado (chorume) gerado durante a operação e após o encerramento do aterro, ao sistema de drenagem de percolados de fundo.

Os drenos verticais são constituídos por tubos perfurados de concreto, com diâmetro de 0,40m, envoltos por um anel de rachão com espessura de 0,50m, o qual é contido por uma tela metálica. O dreno vertical Nº. 8 é apresentado na Figura 4.6. A função do rachão é coletar os percolados (chorume) das camadas de resíduos e conduzi-los aos Drenos Principais de Fundo, enquanto que o tubo de concreto visa assegurar uma superfície livre, para escoamento dos gases para a atmosfera. Estes drenos são alteados simultaneamente à disposição dos resíduos recebidos.

FIGURA 4.6 - DRENO VERTICAL DEVIDAMENTE IDENTIFICADO

- **Drenagem Horizontal**

A drenagem horizontal tem a função de captar o chorume e os gases gerados nas células e conduzi-los aos Drenos Verticais. Eles são implantados em todas as camadas de resíduos, seguindo os mesmos alinhamentos dos drenos de brita do fundo, e possuem dimensões de 0,80 x 0,40 m.

A sua implantação é realizada mediante escavações, desenvolvidas após a conclusão da célula a que ele pertence, mediante o emprego de retroescavadeiras.

A Figura 4.7 indica os drenos horizontais de camadas conectados ao dreno vertical, que por sua vez se conecta à drenagem de fundo do aterro.

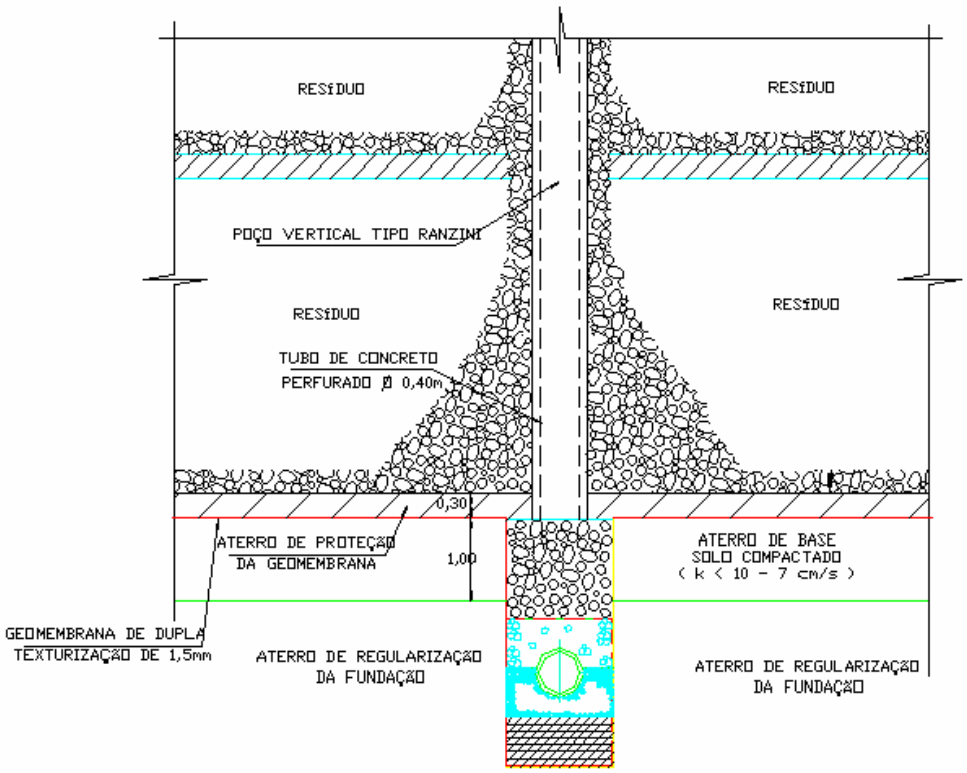


FIGURA 4.7- SISTEMA DE DRENAGEM HORIZONTAL DE CAMADAS

FONTE: S.A. PAULISTA

4.4 OS RESÍDUOS RECEBIDOS

O aterro de Nova Iguaçu recebe os resíduos domiciliares, públicos e hospitalares provenientes do Município de Nova Iguaçu, que passaremos a citar como resíduos municipais, e resíduos de grandes geradores que se enquadram na Classe IIA.

A composição básica dos resíduos municipais é de 49 % resíduos domiciliares e 51 % resíduos públicos, com base na Tabela 4.1, fornecida pela EMLURB no ano de 2004, referente ao ano de 2003, onde são discriminadas as quantidades de resíduo depositadas na CTR Nova Iguaçu.

TABELA 4.1- RESÍDUOS DEPOSITADOS NA CTR NOVA IGUAÇU NO ANO DE 2003 (TONELADAS)

2003	DOMICILIAR	PÚBLICO A GRANEL	VARRIÇÃO	GRANDES GERADORES	TOTAL
FEVEREIRO	7.414,61	7.321,51	276,7	-	15.012,82
MARÇO	13.564,72	17.527,13	476,48	-	31.568,33
ABRIL	13.884,10	8.039,12	102,51	-	22.025,73
MAIO	14.574,45	13.290,35	174,03	-	28.038,83
JUNHO	11.845,28	11.845,28	381,57	30,95	24.103,08
JULHO	11.942,93	15.337,91	336,53	463,79	28.081,16
AGOSTO	10.837,14	13.282,47	497,45	63,02	24.680,08
SETEMBRO	10.502,73	10.613,53	727,42	137,03	21.980,71
OUTUBRO	11.298,00	12.692,24	604,58	5.113,13	29.707,95
NOVEMBRO	11.949,44	10.919,07	601,3	10.821,75	34.291,56
DEZEMBRO	14.784,76	11.353,78	466,61	5.423,14	32.028,29
TOTAL	**132.598,16**	**132.222,39**	**4.645,19**	**22.052,81**	**291.518,55**

FONTE: EMLURB, 2003

Ao final do ano 2003 o aterro começou a receber resíduos Classe II A, sofrendo um incremento progressivo até atingir no final de 2005 aproximadamente 60% do total de resíduos recebidos no aterro.

Atualmente a CTR Nova Iguaçu recebe em média 2.000 toneladas de resíduos por dia.

Para a determinação da composição gravimétrica dos resíduos domiciliares foi adotada a composição elaborada pela COMLURB para o bairro de Bangu, no Município do Rio de Janeiro, com características similares ao município de Nova Iguaçu, já que o mesmo não possui tal estudo. O bairro de Bangu foi escolhido, por sugestão da EMLURB e por ter sido verificado que indicadores econômicos como IDH (Índice de Desenvolvimento Humano) e Renda per-capta do bairro são similares aos do município de Nova Iguaçu. Estes indicadores são apresentados no Anexo 1. A

seguir apresenta-se a Tabela 4.2 contendo a composição gravimétrica do bairro de Bangu.

TABELA 4.2 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA DO BAIRRO DE BANGU -RJ

COMPOSIÇÃO	PERCENTUAL (%)
PAPEL	10,05
RESTOS DE COMIDA	60,29
PLÁSTICO	13,6
VIDRO	2,43
METAL	1,52
OUTROS	12,11

FONTE: COMLURB, 2004

Para determinar a composição dos resíduos púbicos, foram utilizadas informações recebidas da EMLURB, onde consta que mais de 80% do resíduo público é composto por material de entulho. Da Tabela 4.1 extrai-se que 3,4 % dos resíduos públicos são oriundos de resíduos de varrição.

Sendo assim, foi realizada uma composição entre os dados referentes aos resíduos domiciliares e públicos, obtendo-se a composição final para os resíduos municipais apresentada abaixo, na Tabela 4.3.

TABELA 4.3 - COMPOSIÇÃO GRAVIMÉTRICA PARA OS RESÍDUOS DO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU (CALCULADA / ADOTADA)

COMPOSIÇÃO	PERCENTUAL (%)
PAPEL	5,6
PAPELÃO	0,5
RESTOS DE COMIDA	30,6
PODA	3,2
MADEIRA	0,5
PLÁSTICO	7,4
VIDRO	1,2
METAL	1,3
INERTES	40,5
OUTROS	9,1

A composição gravimétrica dos resíduos Classe II A não foi estabelecida devido à complexidade apresentada por alguns dos resíduos presentes em quantidades significativas. Outro fator que contribuiu para inviabilizar a determinação da composição gravimétrica dos resíduos classe IIA foi a variabilidade nas quantidades recebidas de cada resíduo em cada ano estudado. Na Tabela 4.4 estão indicados os principais tipos de resíduos recebidos durante os anos de 2004 e 2005.

TABELA 4.4 - PRINCIPAIS RESÍDUOS CLASSE IIA RECEBIDOS NA CTR NOVA IGUAÇU NOS ANOS DE 2004 E 2005

2004		2005	
RESÍDUO	**%**	**RESÍDUO**	**%**
PROCESSO DE FUNDIÇÃO	42,7	MATERIAL DE DRAGAGEM	31,5
SOLO CLASSE II	28,8	PROCESSO DE FUNDIÇÃO	27,5
TECIDO/PLAST/PAPEL/PAPELÃO	10,2	PROCESSO INDUSTRIAL	7,6
MATERIAL DE DRAGAGEM	4,0	ENTULHO	7,3
LODO DE ETE	2,7	LODO DE ETE	4,8
ENTULHO	2,4	TECIDO/PLAST/PAPEL/PAPELÃO	4,1
ALIMENTOS	2,4	MADEIRA/GALHOS	5,1
PROCESSO INDUSTRIAL	2,4	HIDROPULPER	2,9
HIDROPULPER	1,2	REFRATÁRIOS CERÂMICOS	2,1
MADEIRA	0,4	EMULSÃO ASFÁLTICA	1,5
TERRA INFUSORIA	0,4	ALIMENTOS	1,4
FLUTUADORES	0,3	COURO	0,6
OUTROS	2,1	OUTROS	3,6

FONTE: SA PAULISTA

A ordem de disposição dos resíduos municipais desde a implantação do aterro no ano de 2003, até o final do estudo em dezembro de 2005, é apresentada na Figura 4.8. Cabe mencionar que, eventualmente, essa ordem foi alterada em função das condições de operação do aterro nos períodos de maior pluviosidade.

A disposição dos resíduos Classe II A, oscilou em todas as regiões do aterro.

FIGURA 4.8 - SEQUÊNCIA DE DISPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS MUNICIPAIS

4.5 INFORMAÇÕES SOBRE AS EMISSÕES PRODUZIDAS

Os dados sobre a vazão e as características do lixiviado foram fornecidos pela empresa que administra o aterro. As Tabelas 4.5 a 4.7 apresentam a caracterização físico-química do chorume nos anos de 2003, 2004 e 2005, respectivamente, e a Tabela 4.8 apresenta os registros disponíveis sobre a vazão diária de chorume no período de 2003 a 2005.

Para comparar, nos resultados provenientes da modelagem considerou-se a hipótese de que as medidas oriundas dos meses com registros são representativas das condições médias das emissões. Então estes valores serão empregados nos ajustes e comparações dos resultados fornecidos pelo programa Moduelo 2. Cabe lembrar que a freqüência com que os dados são registrados está distante do que seria ideal para um estudo de modelagem, desta forma a comparação dos resultados acaba sendo pouco precisa.

Foram informados também, dados sobre o aproveitamento de biogás no evaporador de chorume. A caracterização do biogás produzido no aterro é parte deste estudo e foi obtida através de ensaios em cromatógrafo, realizados em amostras retiradas dos drenos verticais, como será apresentado no Capítulo 5.

Os dados de obtenção de energia a partir do biogás permitem estimar o limite mínimo de geração de metano. Porém a utilização do biogás no evaporador é a primeira fase do processo de aproveitamento do mesmo, onde a rede de captação e drenagem é ainda muito simples. No período de estudo o sistema de extração de biogás estava conectado somente a 20% dos drenos verticais implantados.

TABELA 4.5 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2003

ANO	2003			
PARÂMETROS	fev/03	jun/03	ago/03	set/03
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	0,07	1340	1090	1316
pH a 25ºC	7,4	7,4	-	7,8
DBO_5 (mg/L)	1,4	11130	530	320
DQO (mg/L)	100	20330	2450	2300
DBO_5/DQO	0,01	0,55	0,22	0,14
Ferro total (mg/L)	14,1	15,5	7,8	5,3
Fósforo Total (mg/L)	0,14	24,3	7,2	8,3
Potássio total (mg/L)	1	1510	1150	1370
Laboratório	Hidroquímica			

TABELA 4.6 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2004

ANO	2004						
PARÂMETROS	jan/04	fev/04	abr/04	jun/04	ago/04	out/04	dez/04
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	256	352	803	1266	1006	1310	960
pH a 25ºC	6,83	7,29	7,31	7,61	8,02	7,6	7,71
DBO_5 (mg/L)	1509	4413	2811	339	271	2237	1080
DQO (mg/L)	3011	7724	3757	1909	2033	5012	7220
DBO_5/DQO	0,50	0,57	0,75	0,18	0,13	0,45	0,15
Ferro total (mg/L)	33	21	11	5,1	8	9,5	24
Potássio total (mg/L)	-	308	2122	-	1417	1778	2860
Fósforo Total (mg/L)	1,9	5,2	5,6	4,9	5	3,9	6
Sólidos suspensos totais (mg/L)	-	1080	648	520	166	428	615
Laboratório	CTA						

TABELA 4.7 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DO LIXIVIADO DO ATERRO DE NOVA IGUAÇU PARA O ANO DE 2005

ANO	2005				
PARÂMETROS	mar/05	jun/05	ago/05	out/05	dez/05
Nitrogênio Amoniacal (mg/L)	1,9	1292	975,2	537	917
Condutividade (μcm^{-1})	12580	15670	18270	2380	12240
pH a 25ºC	8,3	8	8	7,63	7,6
Temperatura da Amostra (ºC)	36	23	39	38	40
DBO_5 (mg/L)	2200	2449	454	829	1392
DQO (mg/L)	6200	6298	3656	3779	3904
DBO_5/DQO	0,35	0,39	0,12	0,22	0,36
Ferro solúvel (mg/L)	13,8	5,6	7,2	4,3	3,0
Fósforo Total (mg/L)	2	0,15	1,16	3,5	2,24
Niquel (mg/L)	-	0,2	-	-	-
Zinco (mg/L)	-	2,8	-	-	-
Cromo total (mg/L)	-	0,5	-	-	-
Sólidos suspensos totais (mg/L)	10260	12337	10234	9902	8521
Laboratórios	Qualy		Tecma		

TABELA 4.8 – LEITURAS MENSAIS DE LIXIVIADO PERCOLADO NO PERÍODO DE 2003 A 2005 NO ATERRO DE NOVA IGUAÇU

VAZÃO (m^3/dia)	2003	2004	2005
Janeiro	-	58,49	140,33
Fevereiro	-	73,51	151,2
Março	220,09	49,33	156,62
Abril	-	67,97	153,34
Maio	-	-	147,72
Junho	-	-	151,49
Julho	-	61,02	149,67
Agosto	2,74	63,41	-
Setembro	5,48	48,96	-
Outubro	5,48	-	-
Novembro	-	79,49	-
Dezembro	174,94	114,19	-

CAPÍTULO 5 – METODOLOGIAS E RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo é descrita toda a parte experimental desenvolvida no trabalho, a retirada de amostras, os ensaios realizados para obtenção de parâmetros geotécnicos e as demais metodologias analíticas empregadas. São apresentados também os resultados das medições.

Sendo assim, foram realizados ensaios de campo (condutividade hidráulica – Permeâmetro de Guelph) e de laboratório, tais como: de caracterização física, análise granulométrica por peneiramento e sedimentação, densidade dos grãos e limites de liquidez e plasticidade, além de capacidade de campo e análise dos gases gerados, através de cromatografia.

5.1 CLASSIFICAÇÃO DO SOLO DE COBERTURA

A Figura 5.1 mostra a localização dos pontos onde foram retiradas amostras para caracterização do solo de cobertura. A princípio pode-se inquirir sobre a representatividade das amostras, porém deve-se ressaltar que a jazida de onde é retirado o material de cobertura está no próprio local, sendo verificado que não difere significativamente de um ponto a outro, a não ser pela coloração.

O aterro teve inicio em fevereiro de 2003 e sempre foi operado pela mesma equipe que realiza os mesmos procedimentos para a cobertura diária dos resíduos em todos os locais de disposição. Finalmente, por ser um aterro de pequenas dimensões, a disposição dos resíduos se distribui por vários setores em função do tipo de resíduo e da pluviosidade, sendo autorizado o acesso somente a locais que não causassem interferência na operação do aterro.

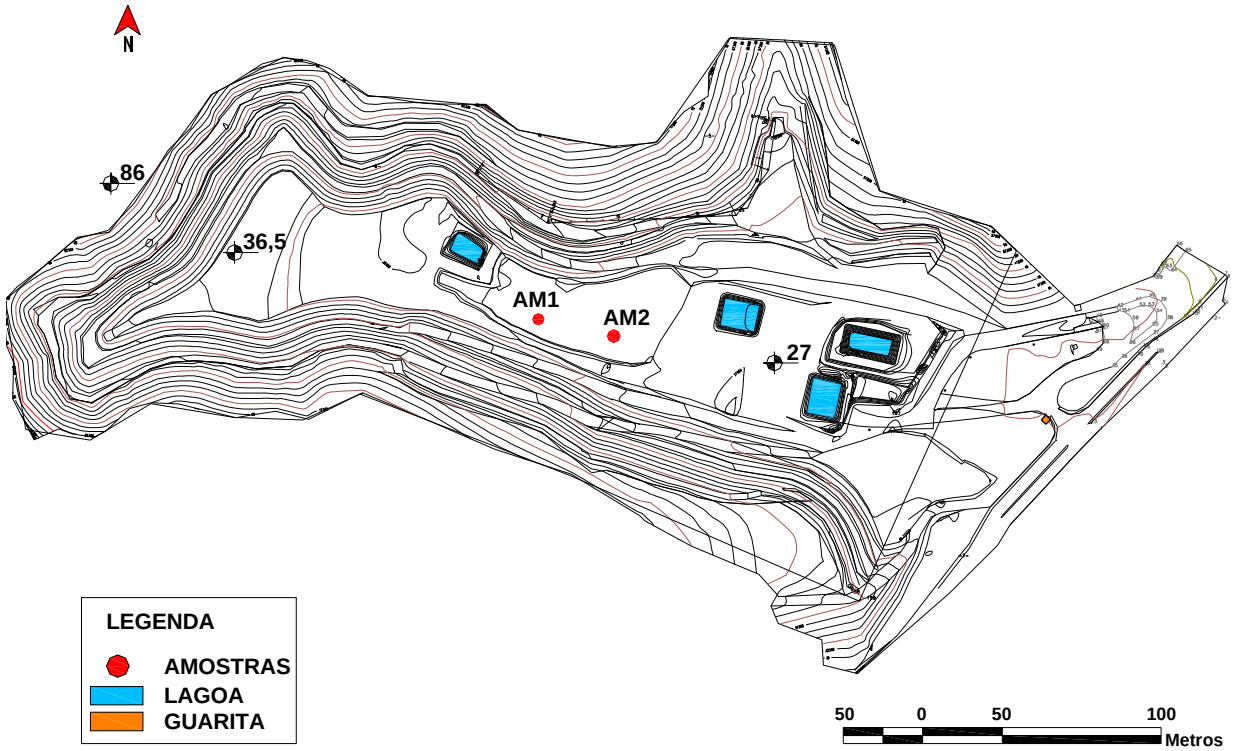


FIGURA 5.1 PONTOS DE COLETA DE AMOSTRAS DE SOLO PARA ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO E PERMEABILIDADE

5.1.1 Procedimento para Coleta de Amostras

Para o ensaio de caracterização do solo, foram retiradas duas amostras deformadas, com o auxilio de uma pequena pá, de dois pontos da cobertura do aterro. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e devidamente identificadas, para posteriormente serem encaminhadas ao laboratório.

As amostras diferiam visualmente na coloração, sendo uma avermelhada e a outra amarelada. A quantidade retirada de cada amostra foi superior a 2 kg, de forma a garantir as frações necessárias para cada um dos ensaios que compõem a caracterização.

5.1.2 Metodologia Empregada

A caracterização da amostra foi realizada seguindo as normas da ABNT específicas para classificação de solos.

Para classificação granulométrica foram utilizados os métodos citados abaixo:

A) Preparação de Amostra para ensaios de caracterização NBR 6457/86

B) Análise Granulométrica por peneiramento NBR 7181/84

C) Análise Granulométrica por sedimentação NBR 7181/84

D) Determinação da Massa Específica NBR 6508/84 para o cálculo da densidade real dos grãos (Gs).

E) Para determinar os índices de consistência (Limites de Atterberg) foram utilizados os seguintes métodos: Limite de Liquidez (LL) NBR 6459/84 e Limite de plasticidade (LP) NBR 7180/84

5.1.3 Resultados Obtidos

As amostras utilizadas para caracterização granulométrica do solo de cobertura foram retiradas de dois pontos do aterro localizados na cota 65. Os ensaios foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia da COPPE - UFRJ. As figuras 5.2 e 5.3 apresentam as curvas granulométricas das duas amostras.

O solo amarelo foi classificado como SC-SM (areia argilo-siltosa) e o solo vermelho como SM-SC (areia silto-argilosa), a classificação foi realizada mediante a utilização do Sistema Unificado de Classificação de Solos (USCS). A composição granulométrica das amostras analisadas é apresentada na Tabela 5.1. Ensaios de caracterização granulométrica apresentados em Brito Filho (2005), nas cotas 47, 49 e 55 classificam o material de cobertura como CH (argila inorgânica de alta plasticidade). Sondagens realizadas no local pela empresa que projetou o aterro, identificaram espessuras variando de 9 a 13 m de solo resíduo-coluvial e solo

saprolítico, sobre saprolito de gnaisse. Tais solos são predominantemente, argilo a silto-arenosos com ocorrências localizadas de fragmentos rochosos e cascalho. A Tabela 5.2 apresenta os limites de Atterberg das amostras de solo de cobertura.

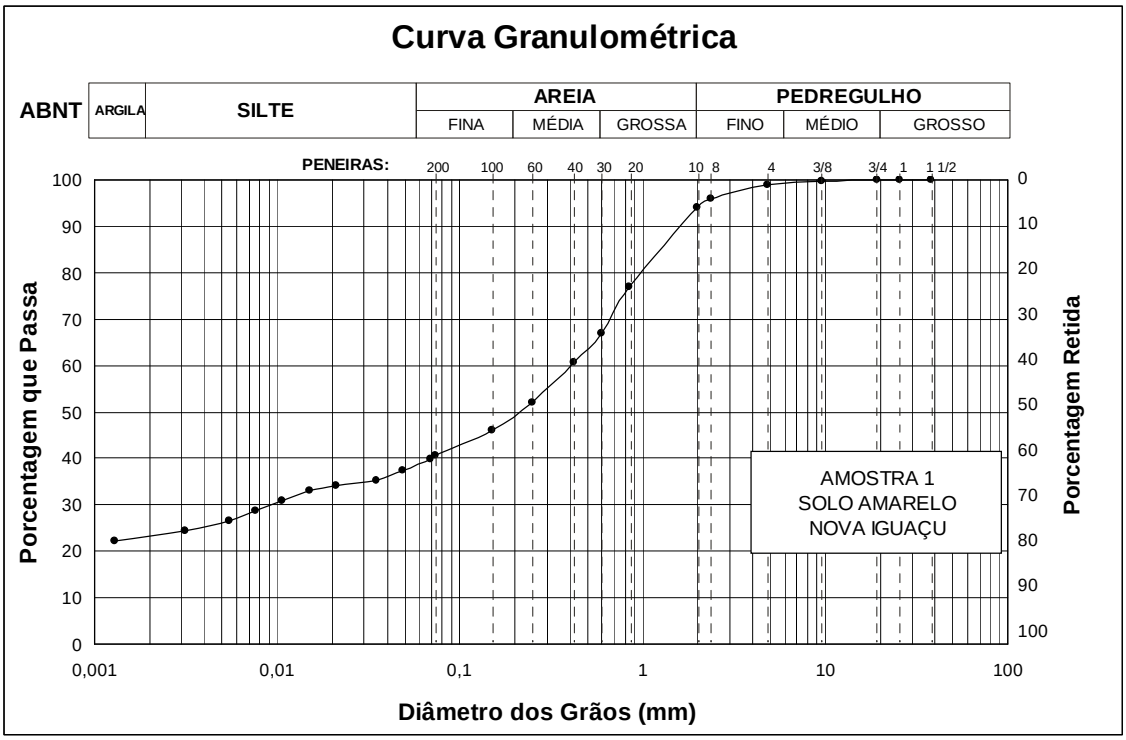


FIGURA 5.2 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO AMARELO USADO COMO MATERIAL DE COBERTURA NO ATERRO

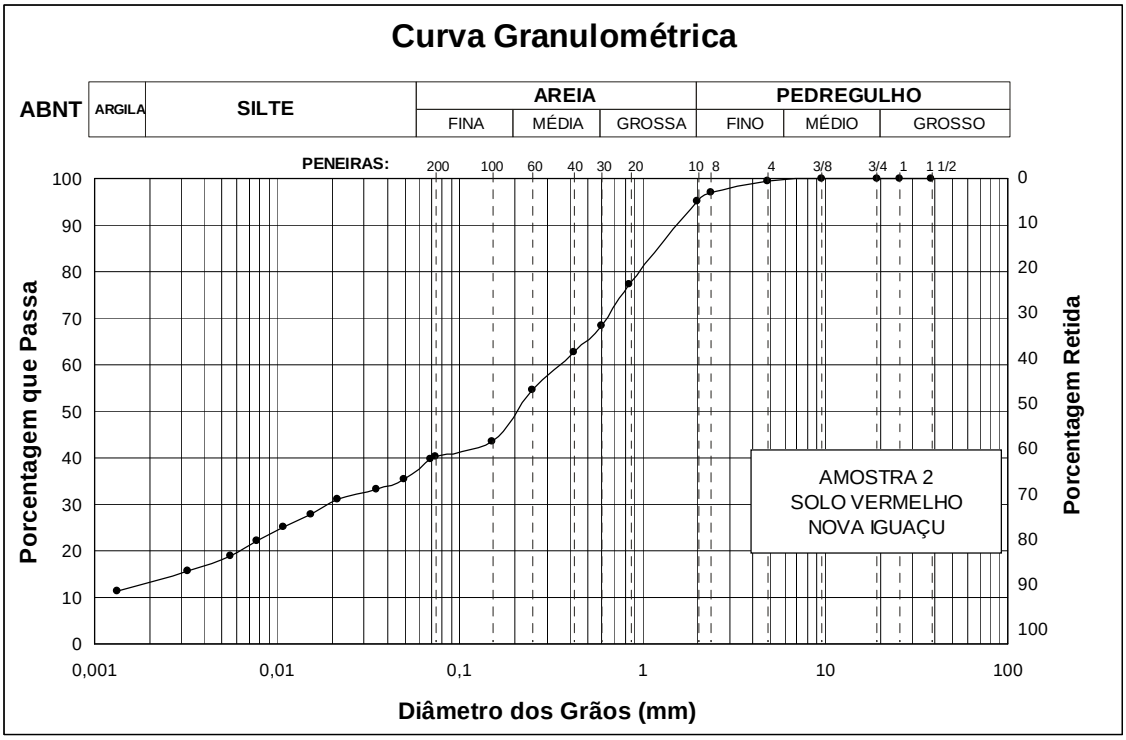


FIGURA 5.3 - CURVA GRANULOMÉTRICA DO SOLO VERMELHO USADO COMO MATERIAL DE COBERTURA NO ATERRO

TABELA 5.1 – COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA DO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO

Amostra	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA (%)					
	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
AM 1 - Solo amarelo	23,3	15,5	10,7	17,5	27,1	6,0
AM 2 - Solo Vermelho	13,3	24,7	11,7	18,7	26,7	4,9

TABELA 5.2 – LIMITES DE ATTERBERG DO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO

LIMITES DE ATTERBERG	SOLO AMARELO	SOLO VERMELHO
LIMITE DE LIQUIDEZ	54,3%	41,5%
LIMITE DE PLASTICIDADE	26,0%	23,8%
ÍNDICE DE PLASTICIDADE	28,3%	17,7%

As planilhas com os cálculos encontram-se no Anexo 2.

5.2 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE VERTICAL E HORIZONTAL DA CAMADA DE COBERTURA

5.2.1 Procedimento para Coleta de Amostras

Para determinação da permeabilidade vertical da camada de cobertura, foram cravados, perpendicularmente ao plano horizontal, dois cilindros de aço com ponta bizelada em dois pontos da cobertura, como mostra a Figura 5.4.

Os cilindros estavam devidamente untados com material lubrificante de modo a diminuir o atrito durante a cravação e desta forma evitar deformações na amostra.

FIGURA 5.4 – COLETA DE AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE VERTICAL DA COBERTURA

Para determinação da permeabilidade horizontal, foi retirada uma amostra indeformada de 30 x 30 x 20 cm, como ilustra a Figura 5.5, com o auxilio de uma pá, uma espátula e uma pequena faca. Posteriormente ao corte da amostra a mesma foi coberta por uma camada de parafina, sendo devidamente sinalizados o topo e a base, e acondicionada em uma caixa de madeira, protegendo as laterais com serragem. Uma vez no laboratório, o cilindro utilizado para determinação da permeabilidade foi inserido transversalmente à parede vertical da amostra.

FIGURA 5.5 – COLETA DE AMOSTRA PARA DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE HORIZONTAL DA COBERTURA

5.2.2 Metodologia Empregada

O ensaio de permeabilidade realizado nas amostras retiradas de dois pontos do solo de cobertura do aterro de Nova Iguaçu foi realizado segundo as normas da ABNT NBR 14.545/2000 - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Argilosos à Carga Variável e NBR 13.292/1995 - Determinação do Coeficiente de Permeabilidade de Solos Granulares à Carga Constante.

A permeabilidade da camada de cobertura também foi determinada através de ensaios *in situ* com o permeâmetro de Guelph.

5.2.3 Resultados Obtidos

O valor médio de kv obtido para o solo vermelho foi de 3,09 x 10^{-7} m/s e para o solo amarelo foi de 1,36 x 10^{-9} m/s. Ensaios apresentados em Brito Filho (2005), nas cotas 47, 49 e 55 determinaram uma permeabilidade vertical média de 5,27 x 10^{-9} m/s.

Nos ensaios de permeabilidade horizontal para os mesmos solos foi obtida uma permeabilidade média de 7,05 x 10^{-8} m/s para o solo vermelho e uma permeabilidade média de 1,66 x 10^{-5} m/s para o solo amarelo. No Anexo 3 estão apresentados os resultados destes ensaios.

Os resultados obtidos para o solo vermelho indicam uma maior permeabilidade da cobertura no sentido vertical, sendo verificado o oposto no solo amarelo onde se observa uma maior permeabilidade horizontal. Cabe lembrar que a execução da camada de cobertura não segue nenhum padrão de compactação, e sendo assim, estas diferenças podem ser uma conseqüência da forma com que cada local foi compactado.

Os valores encontrados se enquadram na faixa de permeabilidade de solos siltosos e areias argilosas, apresentada na Tabela 5.3.

TABELA 5.3 - COEFICIENTES DE PERMEABILIDADE

SOLO	COEFICIENTE DE PERMEABILIDADE
ARGILAS	< 10^{-9} m/s
SILTES	10^{-6} a 10^{-9} m/s
AREIAS ARGILOSAS	10^{-7} m/s
AREIAS FINAS	10^{-5} m/s
AREIAS MÉDIAS	10^{-4} m/s
AREIAS GROSSAS	10^{-3} m/s

FONTE: SOUSA PINTO,2002

Outro tipo de ensaio para determinar a permeabilidade foi realizado in situ, utilizando o Permeâmetro de Guelph, e com ele foram determinadas permeabilidades verticais variando entre 7,7 x 10^{-5} e 7,0 x 10^{-7} m/s, como apresentado no Anexo 4.

5.3 DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CAMPO

A capacidade de campo é o máximo de conteúdo de umidade em equilíbrio com a força da gravidade (CRAFTS et al, 1949), apud Oliveira (2005). Determinando-se a curva característica do solo pode-se encontrar a capacidade de campo do mesmo. Assume-se que a capacidade de campo corresponde ao conteúdo de água no solo retido a um potencial matricial de 0,033 MPa (Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos, cptec/inpe).

5.3.1 Procedimento de Coleta de Amostras

Para determinação da capacidade de campo foram utilizados cinco anéis de "aço" com tampo superior e inferior. Os anéis foram previamente "untados" com material lubrificante, como ilustrado na Figura 5.6, e cravados na camada de cobertura. Após a retirada das amostras, os cilindros foram fechados e identificados, sendo colocados em duas caixas de isopor e encaminhados ao laboratório da Embrapa, Rio de Janeiro, para realização do ensaio.

FIGURA 5.6 – CILINDROS PARA COLETA DA AMOSTRAS PARA DETERMINAÇÃO DA CAPACIDADE DE CAMPO

5.3.2 Metodologia Empregada

O ensaio para obtenção da curva característica foi realizado pela Embrapa Solos utilizando o Aparelho Extrator de Richards.

Aplicando ao solo úmido uma dada força de extração, a intensidade com que o solo retém a umidade que nele fica é equivalente ao valor da força de extração aplicada. Aplicando forças de extração progressivamente mais fortes e determinando a percentagem de água retida contra cada uma, pode obter-se a curva da tensão de umidade característica de um dado solo, em fase de dessecação, curva que exprime a variação da tensão de umidade com o teor de umidade nesse solo.

As amostras de solo recolhidas em campo são saturadas e colocadas em placas cerâmicas previamente saturadas dentro do Aparelho Extrator.

Aplica-se, na parte superior da câmara, uma pressão P conhecida, de modo que a água contida na amostra se mova para a parte inferior da câmara, através da placa porosa, e para a parte exterior do sistema, através do tubo de saída. A placa saturada permite a percolação somente da água contida na amostra, de maneira que o ar injetado permanece sob pressão na parte superior da câmara, não atravessando a placa.

Após um determinado tempo de aplicação da pressão P, o gotejamento através do tubo de saída cessa, indicando que o sistema atingiu a condição de equilíbrio, em que o potencial mátrico da amostra, naquela condição de umidade, é igual à pressão P aplicada.

Nesta etapa, retira-se a amostra e determina-se sua umidade. Em seguida, repete-se o processo, aplicando-se uma pressão P maior que a pressão de equilíbrio anterior. Faz-se isso até que não haja mais alteração na umidade da amostra, por mais que seja aumentada a pressão P.

O valor de umidade da amostra de solo, nesta ocasião, é chamado de umidade residual θ_r, e a umidade da amostra no início do experimento é chamada umidade de saturação θ_S.

As tensões usualmente utilizadas são 0,01;0,033;0,1; e 1,5 MPa. Com elas elabora-se a curva característica de retenção de umidade no solo.

5.3.3 Resultados Obtidos

A curva característica de retenção de água no solo é apresentada na Figura 5.7. A capacidade de campo para as amostras de solo estudadas varia entre 29,8% e 33,1% adotando-se para utilização no programa Moduelo um valor médio de 31 %.

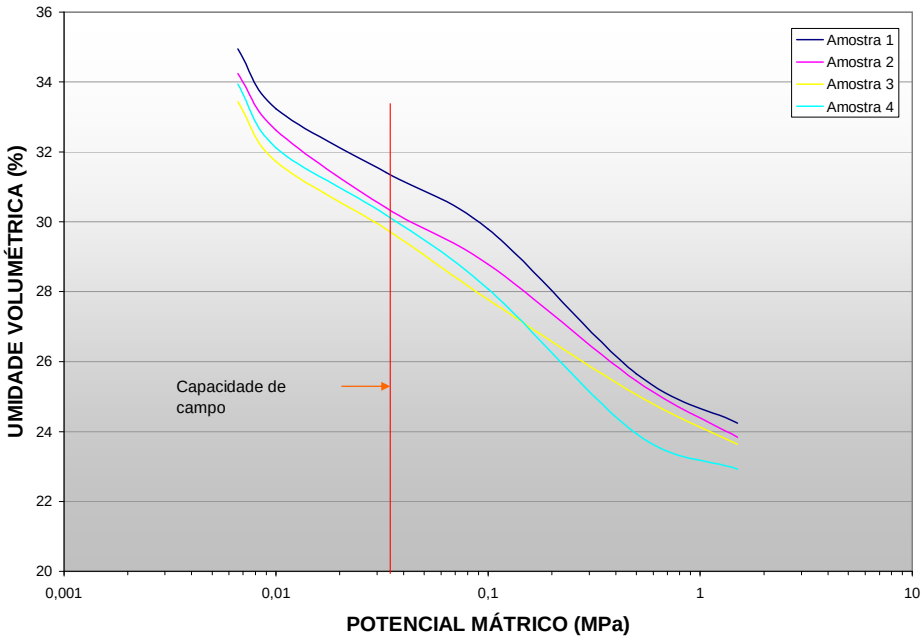


FIGURA 5.7 – CURVA DE RETENÇÃO DE ÁGUA NO SOLO DE COBERTURA DO ATERRO

5.4 DETERMINAÇÃO DA PERMEABILIDADE DOS RESÍDUOS UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH

5.4.1 Metodologia Empregada

O Permeâmetro de Guelph é um permeâmetro de furo e de carga hidráulica constante que mede a condutividade hidráulica saturada de campo acima do lençol freático. (Reynolds *et al.,* 1983).

Esse ensaio consiste em estabelecer um fluxo de água de regime permanente em solos não saturados, através de furos a trado nos quais uma lâmina d'água, com pequena altura, é mantida constante (Reynolds *et al.,* 1985).

O Permeâmetro de Guelph é projetado para medir a condutividade entre 10^{-2} e 10^{-6} cm/s. Abaixo ou acima destas ordens de grandeza, as medições apresentam erros ou não se consegue realizar o ensaio, (Aguiar, 2001).

É composto por uma garrafa de Mariotte que controla a carga constante de água dentro do furo, um tubo de acrílico com uma régua graduada onde a água é introduzida e um tripé que permite adaptar o aparelho a terrenos irregulares, além de acessórios como trados de perfuração e de regularização.

Para se medir a condutividade hidráulica com este Permeâmetro, deve-se fazer um furo com trado manual, na profundidade desejada, e depois trocar a ponta de perfuração do trado por uma de limpeza, que tem por função nivelar a base do furo e regularizar as paredes do furo.

Uma vez realizado o furo, a garrafa de Mariotte é introduzida e a válvula que controla a saída de água é aberta.

Após algum tempo, que dependerá de fatores como a umidade natural do solo e da sua textura, uma pequena área em torno do furo estará saturada e, então, o fluxo torna-se constante. Este valor de fluxo é utilizado no cálculo da permeabilidade. Durante o ensaio, na verdade, não é conseguida a saturação total, e sim uma chamada saturação de campo, pois no campo não se consegue expulsar

completamente o ar dos vazios. Isto não chega a ser uma desvantagem visto que a saturação total é muito difícil de ser atingida em uma situação real. Logo a condutividade obtida será a condutividade hidráulica da saturação de campo (Kfs – hydraulic conductivity at field saturation), Aguiar (2001).

5.4.2 Procedimento Experimental

O ensaio foi realizado em dois pontos diferentes do aterro escolhidos de forma a serem representativos das principais classes de resíduos depositados no local.

O estudo dos dados fornecidos pela EMLURB revelou que aproximadamente 50 % dos resíduos urbanos depositados no aterro são do tipo domiciliar e 50% são classificados como resíduos públicos. Também foi verificado um aumento crescente no recebimento dos resíduos Classe II A, representando em ocasiões até 50% do total de resíduos recebidos.

No momento do estudo não havia resíduos públicos dispostos próximos à superfície, desta forma localizamos o Permeâmetro de Guelph nas áreas onde se encontram aterrados os resíduos domiciliar e Classe II A. As profundidades utilizadas foram de 60 e 65 cm a partir da superfície. A Figura 5.8 abaixo mostra a realização do ensaio nos resíduos Classe II A.

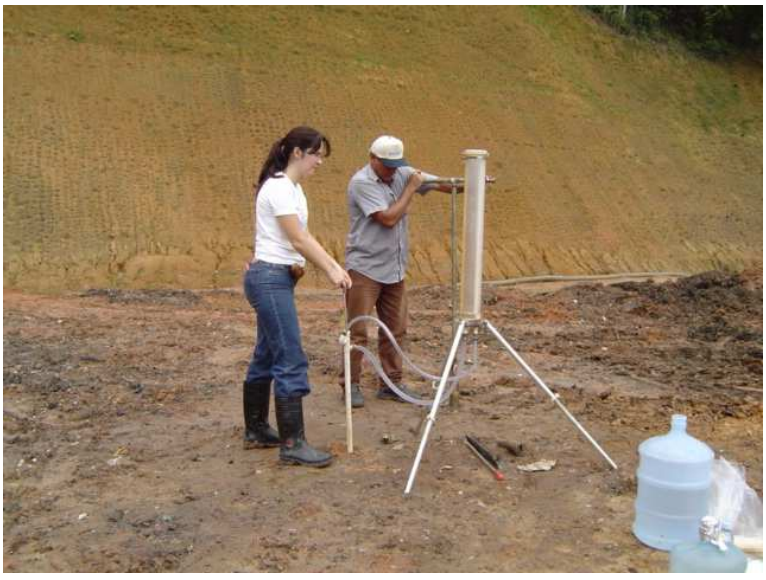


FIGURA 5.8 – ENSAIO DE PERMEABILIDADE DOS RESÍDUOS UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH

5.4.3 Resultados Obtidos

Para os furos realizados no resíduo domiciliar com profundidades de 65 cm, foram observadas as seguintes condutividades hidráulicas: Kfs = 7,77 x 10^{-2} cm/s e 5,9 x 10^{-2} cm/s, e para os furos realizados no resíduo Classe II A, com profundidade de 60 cm, os resultados são Kfs = 1,47 x10^{-3} cm/s e 1,28 x 10^{-3} cm/s; o cálculo da condutividade hidráulica encontra-se no Anexo 4.

5.5 CARACTERIZAÇÃO QUALITATIVA DOS GASES PROVENIENTES DOS DRENOS VERTICAIS

5.5.1 Procedimento para Coleta de Amostras

As amostras de gás destinadas às análises no cromatógrafo são colhidas em seringas de material plástico com volume graduado (60 ml). As seringas são conectadas a uma sonda de borracha com comprimento de 1,5 m, a sonda é introduzida no dreno vertical de gás e então se procede a rinsagem do equipamento de coleta de forma a eliminar a presença de ar ou algum outro gás presente no mesmo. Nos casos em que há queima de biogás, o fogo deve ser apagado previamente à coleta. Após a coleta as seringas são identificadas e acondicionadas para transporte em caixas de isopor com gelo, de forma a preservar a integridade das amostras até a chegada ao laboratório, como ilustram as Figuras 5.9 e 5.10.

Os parâmetros indicados na análise das amostras de gás foram:

1. CH_4 – Metano;
2. CO_2 - Dióxido de Carbono;
3. H_2O – Vapor de Água;
4. Ar

FIGURA 5.9 – COLETA DE AMOSTRAS DO BIOGÁS

FIGURA 5.10 – SERINGAS CONTENDO O BIOGÁS, ACONDICIONADAS EM CAIXAS DE ISOPOR COM GELO

5.5.2 Metodologia Empregada

As amostras foram analisadas em cromatógrafo no Laboratório de Química da COPPE - UFRJ, e o equipamento utilizado para as análises deste trabalho foi o Micro CG da Varian modelo CP 4900, dotado de um microdetector de condutividade térmica. A coluna cromatográfica utilizada foi a CPOX, exclusiva da Varian, para a separação dos gases Ar, CH_4, CO_2 e H_2O.

As condições da coluna são:
Temperatura da coluna: 100 ºC
Pressão da Coluna: 20 psi (138 kPa)
Temperatura do injetor: 50 ºC
Temperatura do detector: 100 ºC

O princípio de funcionamento do cromatógrafo consiste no uso de um gás de arraste que entra pelo cromatógrafo passando pelo injetor, por onde se introduz o gás á analisar, chegando à coluna. Depois de separados na coluna, os componentes atravessam o detector e o sinal é enviado para um CP (computador) e, através de um programa de aquisição, os dados são avaliados.

5.5.3 Resultados Obtidos

Os resultados das análises realizadas em cromatógrafo são apresentados na Tabela 5.4. As amostras 14 e 16 não foram analisadas, pois devido ao tempo de espera para a análise, tiveram a identificação apagada.

TABELA 5.4 – ANALISE CROMATOGRÁFICA DOS GASES REALIZADA EM NOVEMBRO DE 2005 NA CTR NOVA IGUAÇU

DRENO	% Ar	%CH4	%CO2	%H2O
1	58,283	35,713	6,004	0,000
2	19,733	68,187	12,080	0,000
3	86,944	11,147	1,909	0,000
4	44,179	47,526	8,295	0,000
5	25,770	63,338	10,893	0,000
6	98,688	1,027	0,284	0,000
7	30,357	58,957	10,686	0,000
8	13,552	73,172	13,276	0,000
9	99,759	0,241	0,000	0,000
10	15,407	72,228	12,365	0,000
11	5,948	80,537	13,515	0,000
12	41,758	49,300	8,942	0,000
13	6,465	79,645	13,889	0,000
14				
15	58,283	35,713	6,004	0,000
16				
17	98,688	1,027	0,284	0,000
18	73,998	21,478	4,524	0,000
19	31,235	58,847	9,918	0,000
20	71,296	24,615	4,088	0,000
21	62,551	31,860	5,589	0,000
22	71,159	24,857	3,985	0,000
23	71,775	24,004	4,222	0,000
24	13,188	62,911	23,900	0,000
25	48,745	43,519	7,735	0,000
26	16,806	69,467	13,727	0,000
27	52,718	30,844	16,438	0,000
28	29,593	54,660	15,748	0,000
29	96,589	2,828	0,583	0,000
30	68,867	26,273	4,860	0,000

A Figura 5.11 indica a localização dos drenos verticais no aterro e a Figura 5.12 contém a representação gráfica dos dados apresentados na Tabela 5.4.

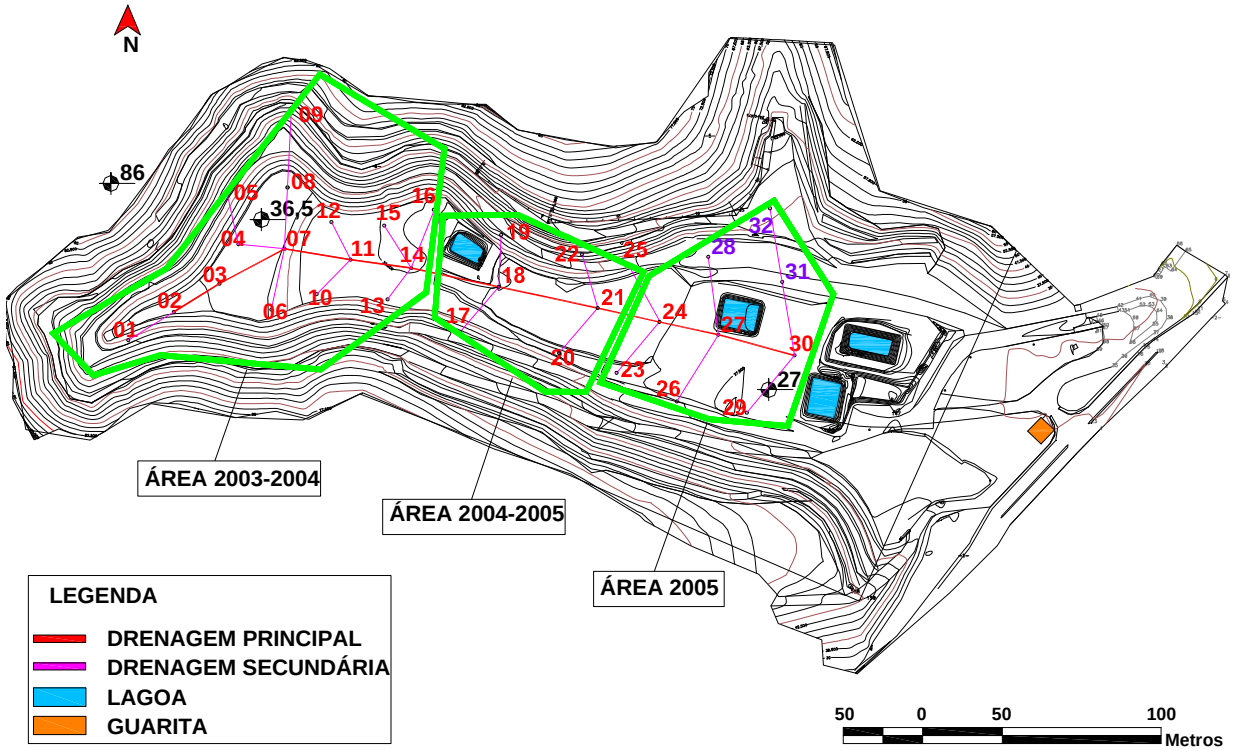


FIGURA 5.11- LOCALIZAÇÃO DOS DRENOS VERTICAIS

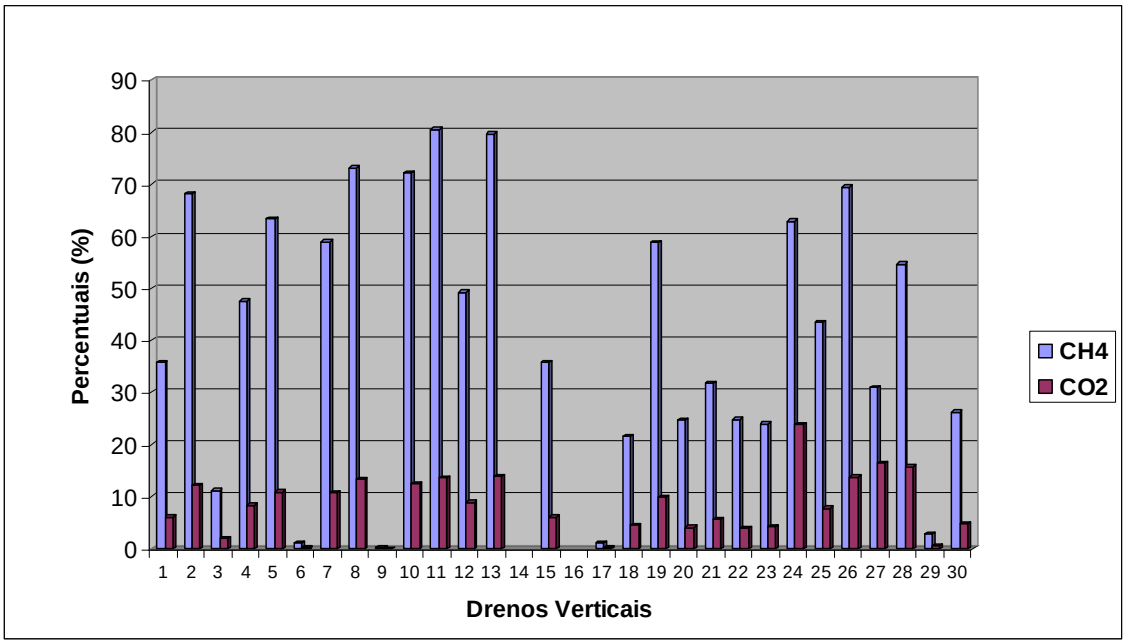


FIGURA 5.12- COMPOSIÇÃO DO BIOGÁS DO ATERRO POR DRENO EM NOVEMBRO DE 2005

Na Tabela 5.5 apresentam-se os resultados das análises em cromatógrafo do biogás apresentadas por Brito Filho (2005), para amostras retiradas dos drenos verticais 2, 7 e 9. As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 mostram a variação da relação CH_4 e CO_2 com o tempo.

TABELA 5.5 – ANALISE CROMATOGRÁFICA DOS GASES CH_4 E CO_2 NO ANO DE 2004 NA CTR NOVA IGUAÇU

DRENOS VERTICAIS	JULHO	AGOSTO	OUTUBRO	DEZEMBRO	MÉDIA
	CH_4/CO_2	CH_4/CO_2	CH_4/CO_2	CH_4/CO_2	CH_4/CO_2
2	76,01 / 14,15	19,66 / 29,68	35,35 / 6,31	45,80 / 8,25	44,21 / 14,60
7	66,99 / 12,69	56,50 / 15,14	69,82 / 12,08	76,21 / 13,12	67,39 / 13,26
9	56,24 / 11,02	54,07 / 10,27	30,84 / 5,42	36,15 / 6,53	44,33 / 8,31

FONTE: Brito Filho (2005)

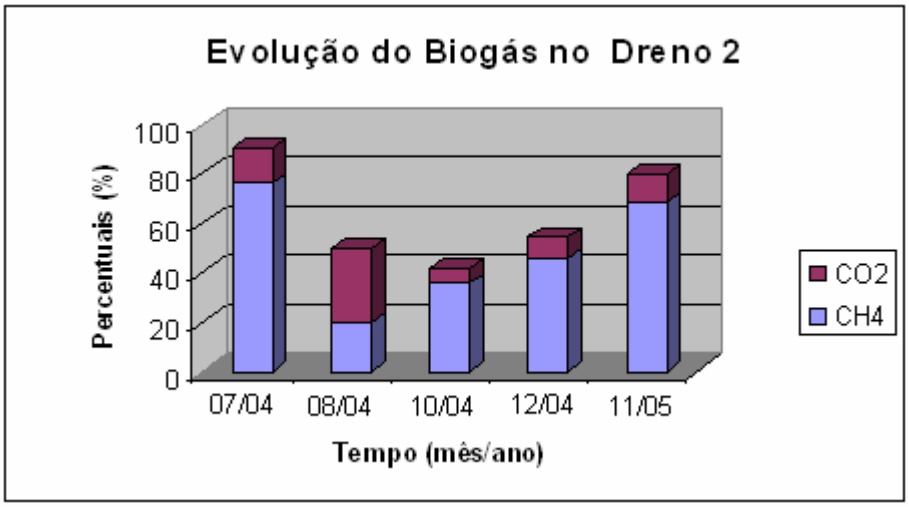


FIGURA 5.13 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 2 AO LONGO DO TEMPO

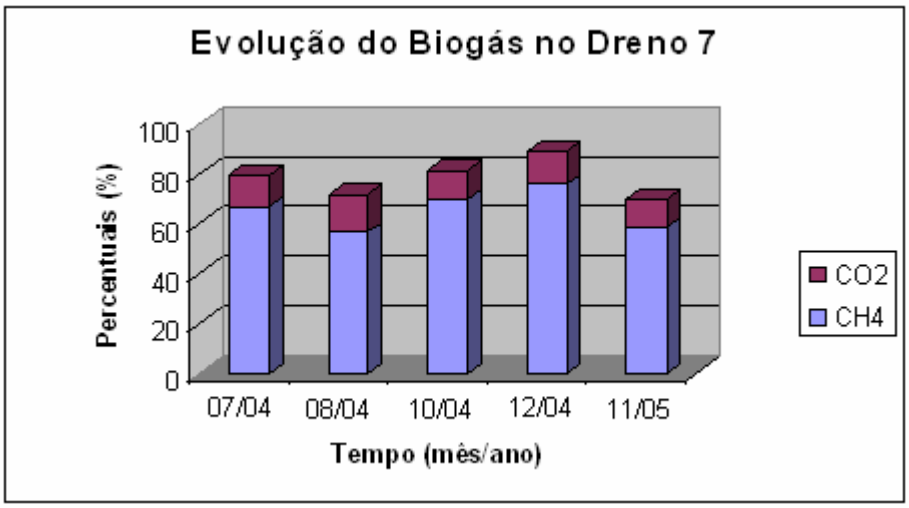


FIGURA 5.14 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 7 AO LONGO DO TEMPO

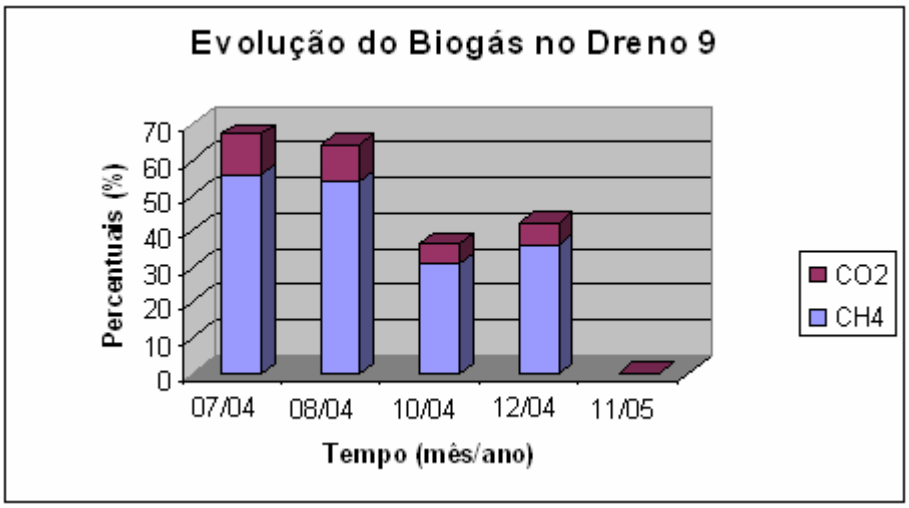


FIGURA 5.15 - PERCENTUAIS DE CH_4 E CO_2 NO DRENO 9 AO LONGO DO TEMPO

5.5.4 Discussão dos Resultados

Com os dados observados nos drenos analisados não é possível identificar separadamente as diferentes fases de decomposição da matéria orgânica como descrito por Tchobanoglous no Capítulo 2.

Nos drenos em que foi constatada uma baixa produção de CH_4, esperava-se encontrar uma elevada concentração de CO_2, porém, foram constatados percentuais

de CO_2 inferiores aos CH_4. Esta expectativa surge do fato de tratar-se de um aterro novo, onde se poderia supor que a fase metanogênica ainda não tivera começado.

Em onze drenos verticais observam-se quantidades de CH_4 variando entre 54 e 80 %, no entanto as quantidades de CO_2 não alcançam 24%.

Valores de metano acima de 60% foram registrados por Brito Filho (2005) no mesmo aterro nos meses de julho, agosto, outubro e dezembro de 2005.

Real (2005) também observou valores máximos de metano variando de 64 a 72% em Paracambí e valores de CO2 inferiores a 10 %, porém cabe ressaltar que trata-se de um lixão que atualmente é operado como aterro controlado, e recebe resíduos desde 1960.

Cabe ressaltar que a operação de um aterro de resíduos é um processo dinâmico, onde novas quantidades de resíduos são depositadas diariamente e onde locais com depósitos mais antigos, no caso do aterro analisado, são freqüentemente escavados para a implantação de drenos horizontais entre camadas, alterando desta forma os processos que vinham sendo desenvolvidos na massa de resíduos. Assim, na mesma área do aterro podem ocorrer diferentes fases de geração de metano ao mesmo tempo.

Ainda, as altas concentrações de metano podem ser atribuídas ao fato do aterro receber depósitos de resíduos Classe IIA, entre os quais estão incluídos rejeitos de dragagem, de locais não especificados, e lodo de esgoto cujos processos de decomposição em aterros sanitários não foram analisados.

CAPÍTILO 6 - APLICAÇÃO DOS MODELOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 METODOLOGIAS DA USEPA, BANCO MUNDIAL E IPCC

6.1.1 Parâmetros Utilizados

Para o cálculo da geração de metano no aterro de Nova Iguaçu, são utilizadas as diferentes metodologias discutidas no Capítulo 3 e adotados os parâmetros que cada uma propõem para as condições encontradas no local estudado. As planilhas de cálculo encontram-se no Anexo 5. Os parâmetros L_0 e k empregados na simulação de cada metodologia estão apresentados na Tabela 6.1.

TABELA 6.1 – VALORES DE L_0 E k RECOMENDADOS

PARÂMETROS	USEPA	BANCO MUNDIAL	IPCC
k (ano^{-1})	0,04	0,06	0,05
L_0 (m^3 CH_4/ t_{RSU})	100	170	61*

* Valor Calculado

As simulações realizadas consideram primeiramente os RSU, cuja composição gravimétrica é estimada no Capítulo 4, Tabela 4.3, e logo depois o total de resíduos depositados no aterro.

Na simulação realizada considerando o total de resíduos depositados no aterro de Nova Iguaçu, utiliza-se a mesma composição gravimétrica dos RSU, por não se ter informações suficientes para determiná-la adequadamente. Contribui, ainda, para esta escolha o fato de que os RSU de Nova Iguaçu contêm um grande percentual de material inerte.

Após a simulação utilizando os parâmetros sugeridos por cada metodologia, são realizadas novas simulações, para o total de resíduos dispostos no aterro, considerando para as três metodologias os mesmos parâmetros k e L_0. A finalidade desta nova simulação é comparar o comportamento dos modelos em iguais condições.

O valor de L_0 é fixado em 164 m³ CH_4/ t $_{RSU}$ por ter sido o valor utilizado no projeto do aterro de Nova Iguaçu e aprovado pelo Painel Metodológico dos projetos do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo – MDL.

O valor de k é fixado em 0,1 anos^{-1} por ser o valor de projeto e posteriormente em 0,05 anos^{-1} por ser o valor intermediário das três metodologias propostas, mostrados na Tabela 6.1.

6.1.2 Resultados Obtidos e Discussão

As três metodologias apresentadas anteriormente contêm equações de primeira ordem que utilizam os parâmetros: velocidade de degradação, k, taxa de geração de metano, Lo, quantidade de resíduo depositado e tempo.

Nas Tabelas 6.2 e 6.3 são apresentados os resultados obtidos através da aplicação das diferentes metodologias de cálculo da geração de metano no aterro de Nova Iguaçu.

TABELA 6.2 – GERAÇÃO DE CH_4 CONSIDERANDO APENAS OS RSU (m³/ano)

ANOS	USEPA	BM	IPCC
2003	1.056.591	2.748.553	793.856
2004	2.111.945	2.801.875	1.564.396
2005	3.166.484	2.856.232	2.313.056
2006	4.220.632	2.911.642	3.041.207
2007	5.274.808	2.968.128	3.750.161

TABELA 6.3 – GERAÇÃO TOTAL DE CH_4 NO PERÍODO MONITORADO (m^3/ano)

ANOS	USEPA	BM	IPCC
2003	1.143.062	2.973.494	858.825
2004	3.726.502	4.943.875	2.244.863
2005	5.609.003	5.059.432	3.596.680

A metodologia apresentada pelo Banco Mundial sugere uma velocidade de degradação , representada pelo parâmetro k, mais alta e um potencial de geração de metano, L_0, superior aos valores que a USEPA propõe. Porém, ao aplicar ambos métodos, a equação sugerida pela USEPA fornece resultados de geração de metano superiores aos encontrados com a metodologia Scholl Canyon sugerida pelo Banco Mundial.

A metodologia apresentada pelo IPCC permite, conhecendo-se as características dos resíduos depositados no aterro, calcular o valor de L_0. O cálculo efetuado com os dados do aterro estudado fornece, neste caso, um valor de L_0 inferior aos valores sugeridos pelas metodologias anteriores. Para o valor de k o IPCC propõe uma faixa de valores, porém sugere para aterros em que não se conheça a velocidade de degradação um valor intermediário aos valores propostos pela USEPA e pelo Banco Mundial.

A aplicação da metodologia apresentada pelo IPCC para o período monitorado, 2003 a 2005 (Tabela 6.3), fornece quantidades de metano inferiores às obtidas aplicando as metodologias da USEPA e do Banco Mundial. Entretanto, se considerarmos o período total de disposição de resíduos no local estudado, cujo fechamento está previsto para o final do ano 2007 (Tabela 6.2), podemos observar que o valor determinado com a metodologia IPCC encontra-se numa posição intermediária às demais metodologias.

Ao extrapolar, supondo que o local analisado continua recebendo resíduos por um período maior, observa-se a mesma tendência, e no ano 2009 a geração de metano fornecida pela metodologia da USEPA seria o dobro do valor obtido utilizando a metodologia apresentada pelo Banco Mundial, enquanto o valor fornecido pela metodologia do IPCC permaneceria com um valor intermediário.

As Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 abaixo representam a variação da geração de biogás ao longo do tempo considerando a totalidade dos resíduos dispostos até o ano de 2005 e supondo que nos anos 2006 e 2007 não há variação na proporção de resíduos classe IIA recebidos, em relação ao volume total de resíduos.

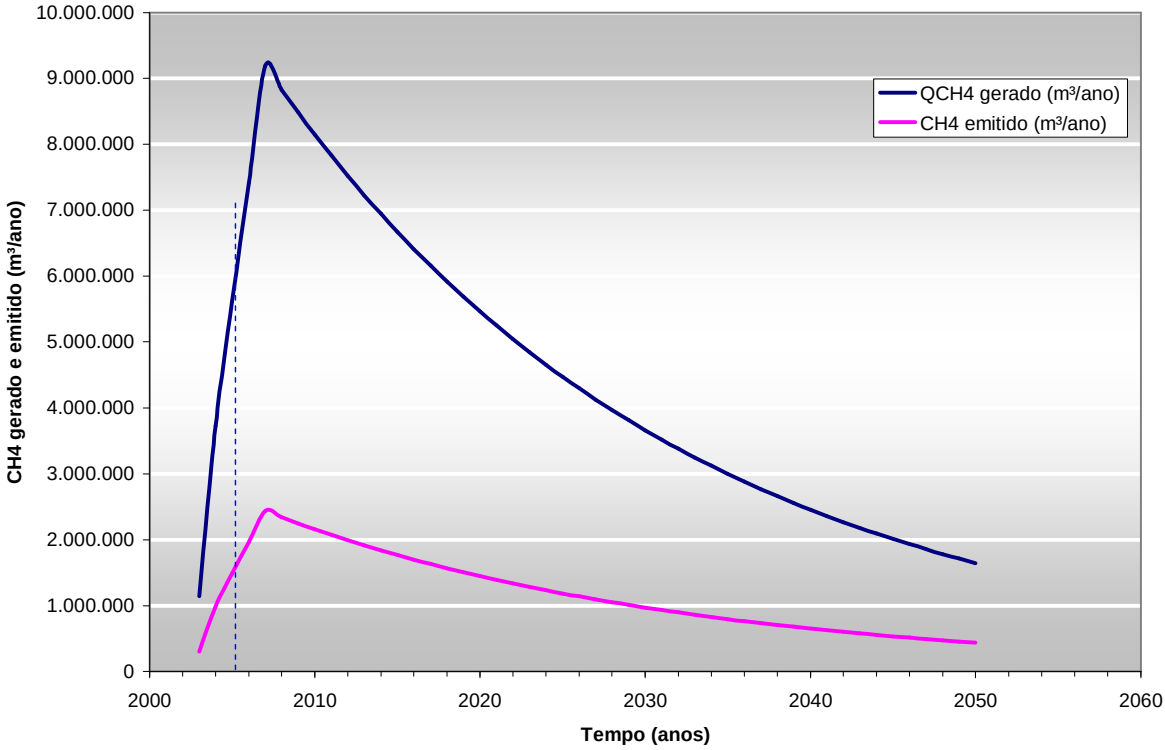


FIGURA 6.1 – GERAÇÃO E EMISSÃO DE METANO – METODOLOGIA DA USEPA

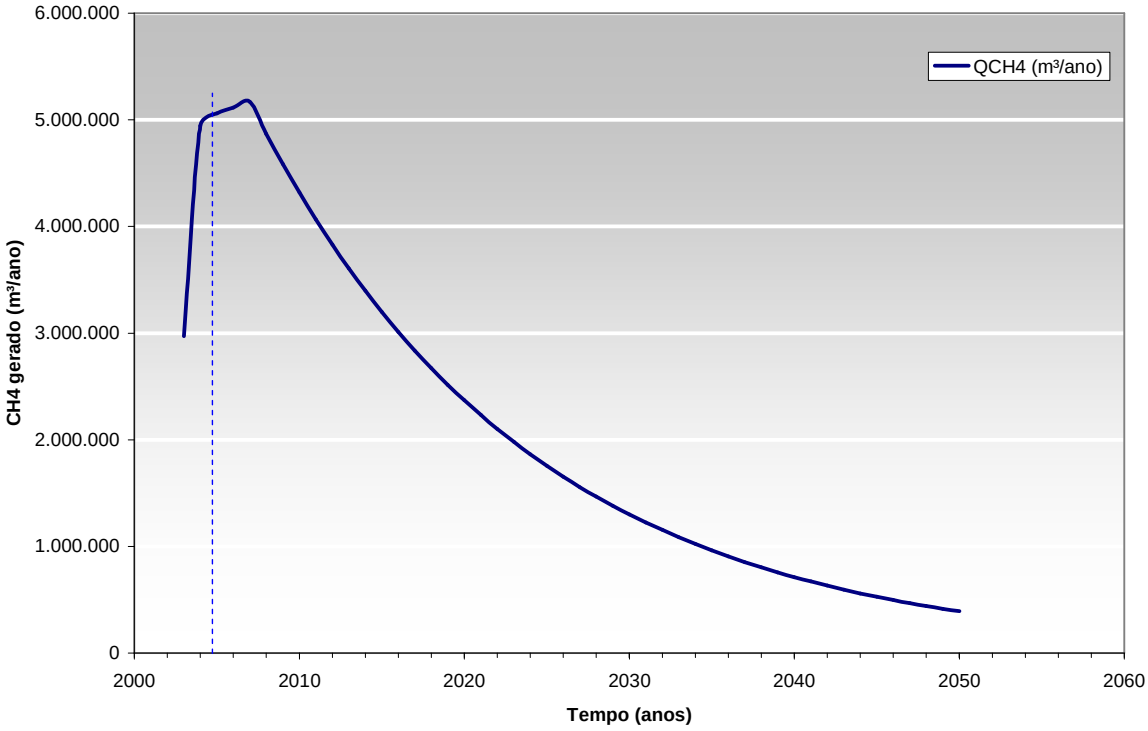


FIGURA 6.2 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIA RECOMENDADA PELO BANCO MUNDIAL

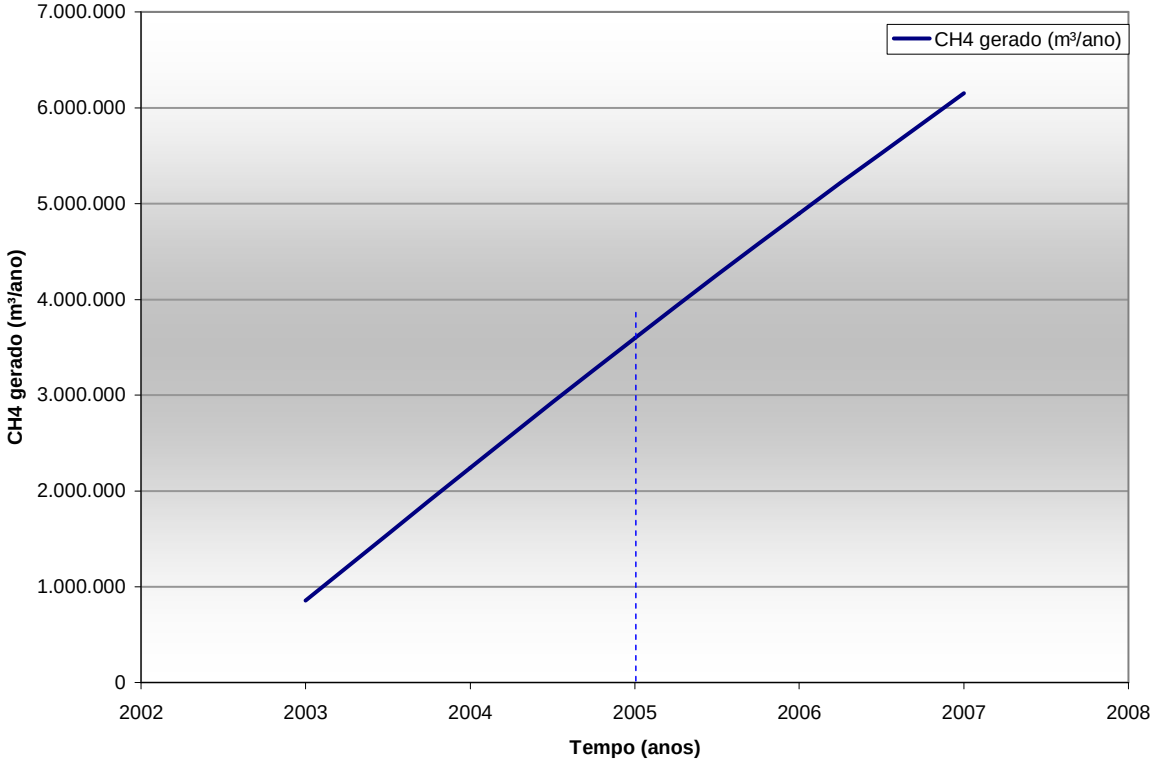


FIGURA 6.3 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIA DO IPCC

A Figura 6.4 reúne as previsões de geração de metano das Figuras 6.1, 6.2 e 6.3 de forma a comparar visualmente as diferentes metodologias.

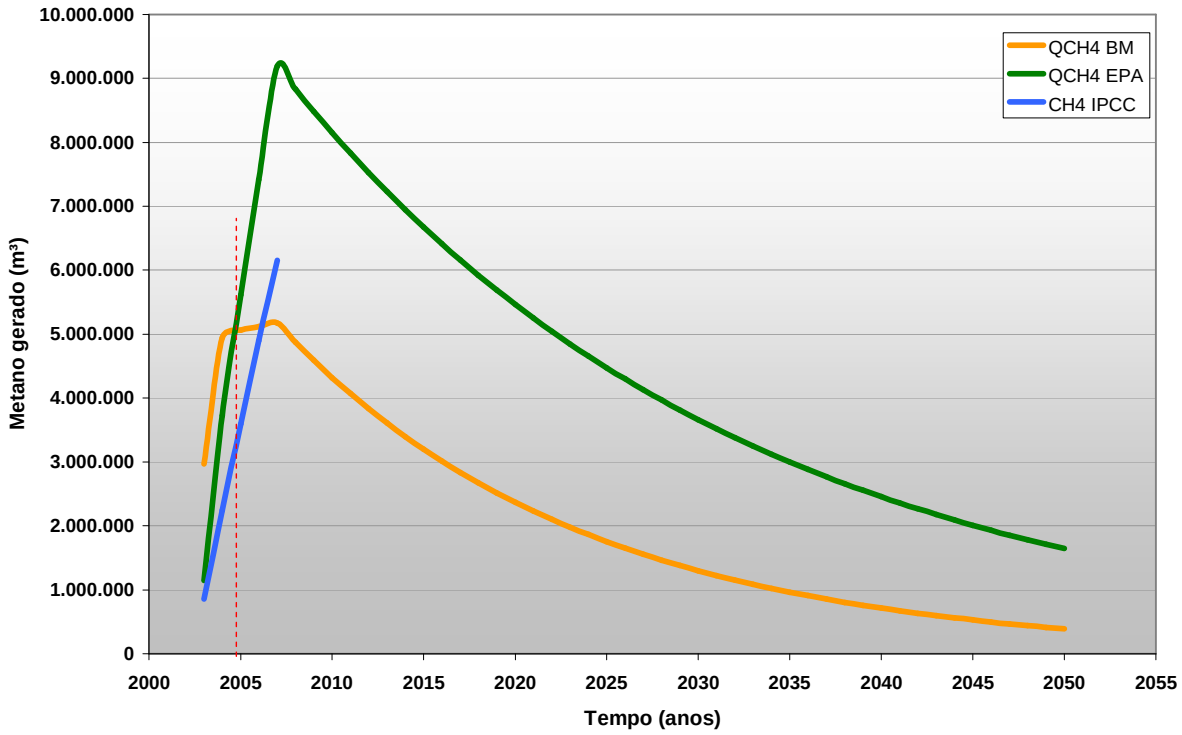


FIGURA 6.4 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIAS USEPA, BM E IPCC

Como já foi mencionado anteriormente e pode ser observado na Figura 6.4 a metodologia do IPCC é adequada para utilização em aterros ativos, enquanto a metodologia do Banco Mundial apresenta uma melhor representação para aterros já encerrados. A metodologia USEPA destaca-se por representar adequadamente a variação de geração de metano tanto para aterros ativos como para aterros já encerrados.

A Tabela 6.4 apresenta a geração de CH_4 em m³ prevista para o ano de 2007 obtida considerando os parâmetros k e L_0 sugeridos por cada modelo, mostrados na Tabela 6.1, e fixando para as três metodologias os mesmos parâmetros. Para tal são considerados os parâmetros de projeto (k= 0,1 ano $^{-1}$ e L_0= 164 m³ CH_4/t) e uma variação onde se considera o L_0 de projeto e o k= 0,05 ano $^{-1}$ por ser o valor intermediário das três metodologias propostas.

TABELA 6.4 – GERAÇÃO DE CH_4 PREVISTA PARA O ANO DE 2007 (m^3)

Parâmetros	USEPA	BM	IPCC
Sugeridos: Tabela 6.1	9.190.223	5.171.328	6.153.284
k= 0,1 ano $^{-1}$ e L_0=164 $m^3/CH_4/t$ (valores de projeto)	32.715.735	8.314.685	29.897.784
k= 0,05 ano $^{-1}$ e L_0=164 m^3 CH_4/t	18.392.017	4.157.342	16.657.144

A Figura 6.5 apresenta a geração de CH_4 prevista utilizando os parâmetros k e L_0 de projeto e variando o k de projeto para um valor de 0,05 anos $^{-1}$ por ser um valor intermediário das três metodologias propostas.

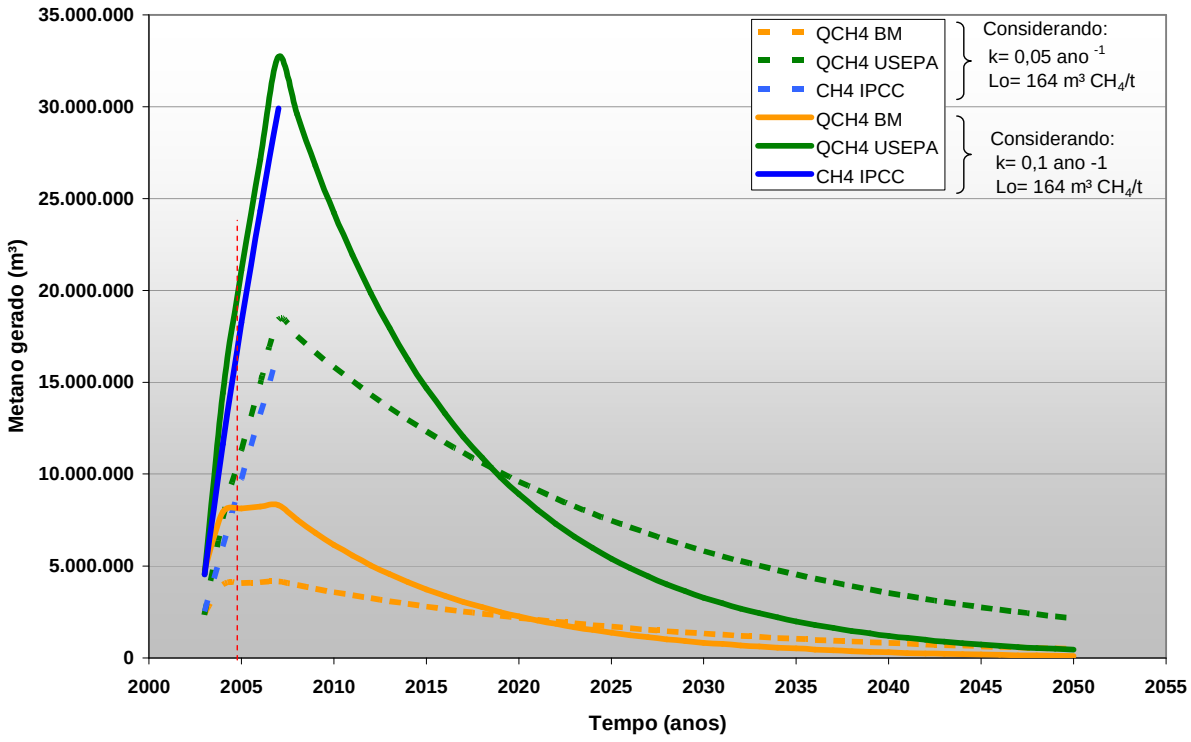


FIGURA 6.5 – GERAÇÃO DE METANO – METODOLOGIAS USEPA, BM E IPCC

Observa-se que variando a taxa k de 0,1 para 0,05 os resultados de geração de CH_4 são reduzidos praticamente à metade, o que demonstra a importância da sua determinação.

6.2 MODUELO 2

6.2.1 Introdução da Informação Disponível

O aterro de Nova Iguaçu foi escolhido para o estudo por ser o que possui a base de dados mais completa da região, apesar disso as informações não possuem a riqueza ideal para um estudo de modelagem deste tipo.

6.2.1.1 Dados morfológicos

Neste setor são introduzidas informações da topografia do terreno e da configuração das células do aterro. Célula é a denominação dada a cada volume unitário disposto no aterro. As células são definidas com base quadrada de dimensões 15 x 15 m e altura de 5 m, incluindo a camada de cobertura de 30 cm.

O sistema de drenagem inferior foi conformado com base na rede de drenagem de fundo apresentada na Figura 4.5.

As características da drenagem principal e secundária são apresentadas na Tabela 6.5.

TABELA 6.5 - CARACTERÍSTICAS DA DRENAGEM IMPLANTADA

	Drenagem Principal	Drenagem Secundária
Diâmetro / área	0,40 m	0,56 m²
Coeficiente de Manning	0,013	
Declividade	2%	2%
Raio de influência	30 m	20 m
N°de células em que se situa	28	232

As características hidrológicas das células são apresentadas na Tabela 6.6, onde na última coluna é incluído um comentário sobre a origem dos dados adotados.

TABELA 6.6 - CARACTERÍSTICAS HIDROLÓGICAS DAS CÉLULAS DO ATERRO

PROPRIEDADE	CÉLULA ATERRO	CÉLULA DRENO	COMENTÁRIO
Capacidade de campo (%)	31	10*	Valor medido em campo
Umidade de saturação (%)	47	50*	Valor medido em campo
Permebilidade horizontal (m/s)	1.10^{-5}	1.10^{-3} *	Valor da Bibliografia, Lobo, 2003
Permeabilidade vertical da cobertura (m/s)	$1{,}55.10^{-7}$		Valor medido em campo
Variação da permeabilidade do resíduo com a sobrecarga (m³/T)	0,264		Rowe e Nadarajah (1996), apud Lobo, 2003
Variação da permeabilidade da cobertura resíduo com a sobrecarga (m³/T)	0,075		
Densidade da cobertura (T/m³)	1,67		Valor medido em campo
fc Horton (mm/h)	3,8		Silte arenoso - silte argiloso Huber e Dickinson (1998), apud Lobo, 2003
fo Horton (mm/h)	76		
k Horton (1/h)	4,14		Valor recomendado em Huber e Dickinson (1998), apud Lobo, 2003

* Valores recomendados pelo modelo

6.2.1.2 Produção

O número de células colocadas anualmente foi extraído das informações fornecidas pela CTR Nova Iguaçu, correspondentes à rastreabilidade dos resíduos. Tais informações são apresentadas no Anexo 6.

A Tabela 6.7 apresenta a evolução da disposição de resíduos no período de 2003 a 2005.

TABELA 6.7 – MÉDIA DAS CÉLULAS PREECHIDAS MENSALMENTE NO ATERRO

Ano	Res. Classe IIA / mês	RSU / mês	Total Resíduos/ mês
2003	7	25	32
2004	18	26	44
2005	42	26	68

Com os dados mencionados, procede-se ao preenchimento do aterro, obedecendo a ordem informada na Figura 4.8.

O preenchimento das células pode ser visualizado de uma forma mais adequada utilizando o recurso de desenho para vista de planta e perfil, ilustrado na Figura 6.6, permitindo corrigir possíveis erros ao longo da disposição das células.

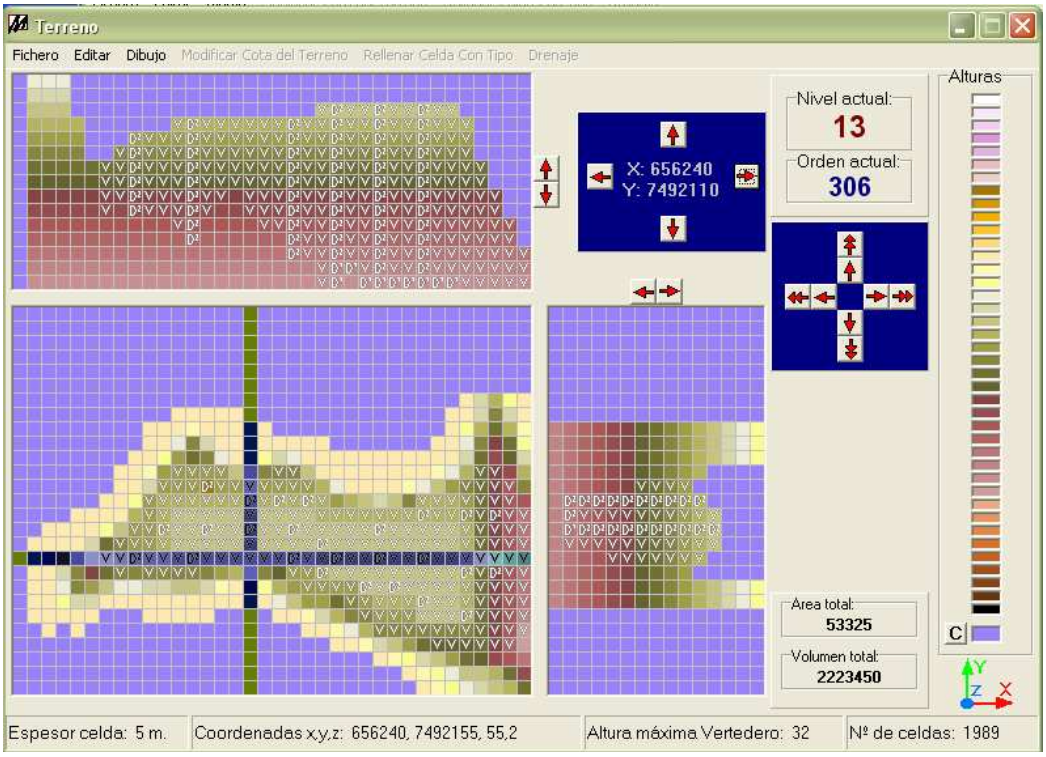


FIGURA 6.6 - VISUALIZAÇÃO DO PREENCHIMENTO DO ATERRO

6.2.1.3 Dados climáticos

A introdução dos dados climáticos é uma das mais complexas do sistema de fornecimento de dados ao Modelo, já que os dados de precipitação são inseridos de forma horária, durante todo o período de modelagem. Dados de velocidade do vento, umidade relativa e horas de insolação são dados informados diariamente. Os dados relativos à temperatura requerem informação diária média, máxima e mínima.

Apesar de aterro haver adquirido recentemente uma estação meteorológica com capacidade para obtenção dos dados necessários a modelagem, ela não possui esta diversidade de informações correspondente a todo o período de operação do aterro, desta forma, como já foi mencionado anteriormente, os dados meteorológicos foram extraídos da estação Anchieta, pertencente à Fundação Geo-Rio.

6.2.1.4 Sensibilidade do modelo

A seguir descreve-se a sensibilidade do modelo aos diferentes parâmetros de biodegradação apresentados por Lobo (2003) e verificados durante a calibração do modelo para o estudo do aterro de Nova Iguaçu.

Velocidades de hidrólise rápida e lenta – Kh_r e Kh_l

São os parâmetros de calibração aos quais o modelo é mais sensível. O aumento da velocidade de hidrólise tem como conseqüência uma dissolução mais rápida da matéria sólida e desta forma antecipa o surgimento dos contaminantes no lixiviado. Nos compostos biodegradáveis o fato de passar mais rapidamente ao lixiviado acelera seu desaparecimento, produzindo uma maior quantidade de biogás.

Constante de acetogênese k_A e constante de metanogênese acetofílica k_{AC}

Ao aumentar seu valor a DBO diminui porque se acelera o consumo de acetato e, ao mesmo tempo, a matéria orgânica é convertida a um estado mais degradado, cuja demanda de oxigênio é menor. Produz o mesmo efeito na DQO, porém a contaminação por elementos não biodegradáveis não é atenuada significativamente.

O parâmetro k_A também influencia as emissões gasosas posto que é fundamental para o surgimento de H_2 e CO_2, regulando a geração dos mesmos. Também influi nos valores do CH_4 gerado, porque intervém nas taxas de consumo de acetato e H_2.

O parâmetro k_{AC} possui um efeito muito similar a k_A, sendo sua sensibilidade um pouco menor.

Constante de carreamento "fracción de arrastre" f_{ar}

Este fator relaciona a massa biodegradável de resíduo hidrolisada com a fração orgânica não biodegradável carreada no processo. Seu valor condiciona unicamente os resultados da contaminação orgânica que inclui compostos não biodegradáveis, representados pela DQO.

Constante de metanogênese hidrogenofílica k_H

Intervém nos processos de consumo e geração de gás. Esta constante influi sensivelmente na quantidade de hidrogênio emitido, porém provoca uma pequena variação nas emissões de CO_2 e CH_4, devido à relação estequiométrica da reação, que para formar um mol de metano consome quatro de hidrogênio e um de dióxido de carbono.

6.2.1.5 Calibração do modelo

Previamente à calibração do modelo de biodegradação foi realizada a calibração do modelo hidrológico, cujo resultado é apresentado do Anexo 7.

Calibrado o modelo hidrológico procede-se a determinar os valores dos parâmetros de biodegradação que melhor aproximem as curvas geradas pela modelagem dos dados registrados no aterro.

No processo de calibração os primeiros fatores a serem ajustados são as constantes de hidrólise de forma a aproximar os valores de nitrogênio amoniacal medidos e simulados. Logo, calibrando simultaneamente k_A e k_{AC} aproxima-se a DBO. Se a DQO não corresponder aos valores medidos, a mesma pode ser ajustada

variando o parâmetro f_{ar} até encontrar o melhor ajuste. Finalmente, se são conhecidos os dados de produção de biogás pode-se ajustar o parâmetro k_H.

Após vários testes foram obtidos os parâmetros de calibração apresentados na Tabela 6.8. Nas Figuras 6.7 e 6.8 são apresentados os valores medidos no lixiviado do Aterro de Nova Iguaçu no período de 2003 a 2005 e simulados pelo programa Moduelo 2, de $N\text{-}NH_3$ e DQO-DBO respectivamente. Os valores testados estão compreendidos na faixa sugerida pela literatura, Tabela 3.13.

TABELA 6.8 – PARÂMETROS DE CALIBRAÇÃO DA DEGRADAÇÃO EM UMA CÉLULA DE RESÍDUOS

PARÂMETRO	VALOR DE CALIBRAÇÃO
kh_r (d^{-1})	0,006
kh_l (d^{-1})	0,0005
k_A (d^{-1})	0,5
k_{AC} (d^{-1})	0,1
kH_2 (d^{-1})	200
far	0,08
T0 ráp (d)	0
T0 len (d)	365

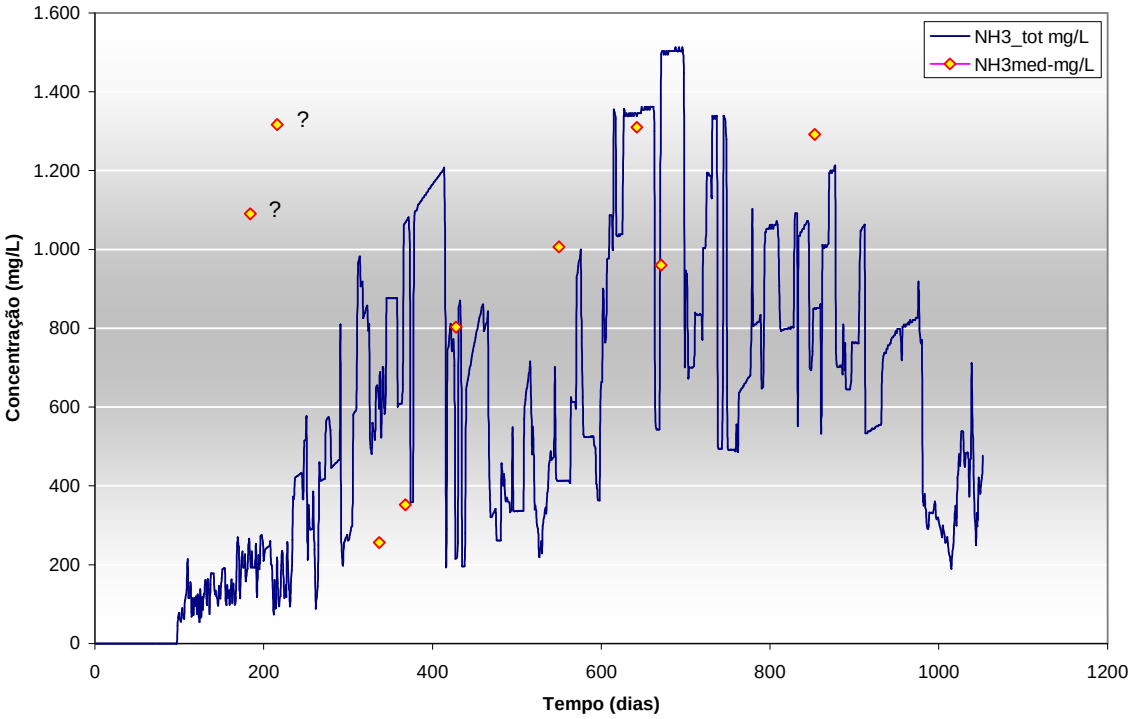


FIGURA 6.7 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS DO NH_3 PARA O ATERRO DE NOVA IGUAÇU

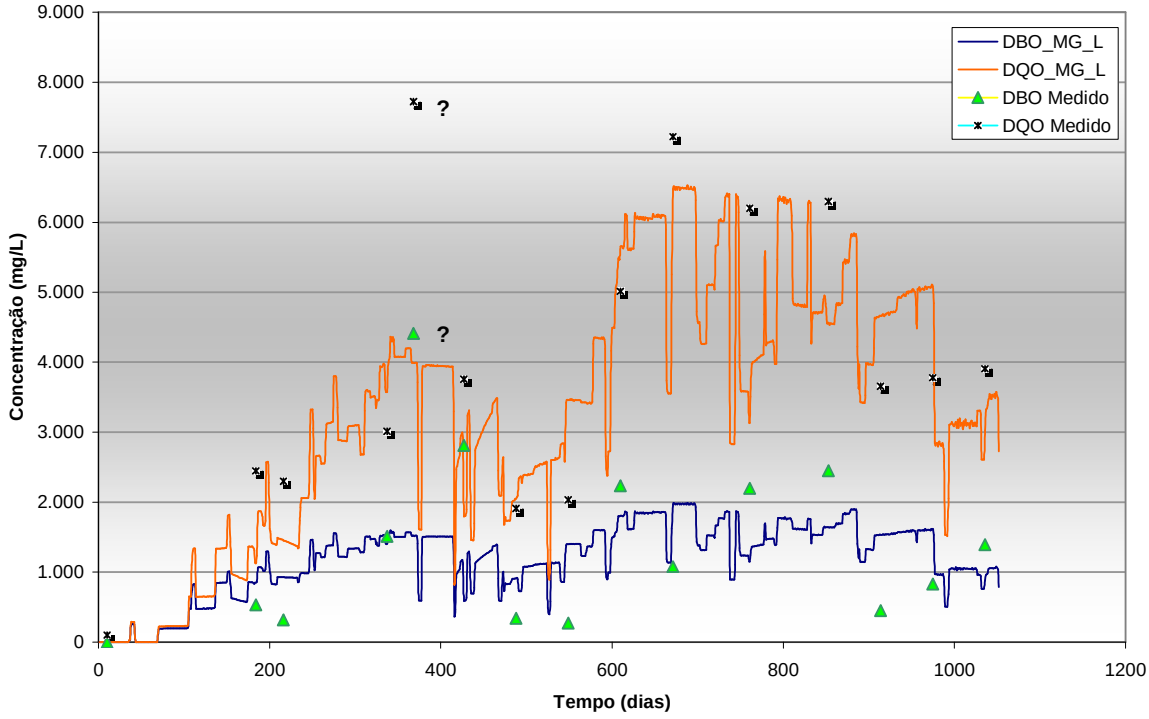


FIGURA 6.8 – COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS SIMULADOS E MEDIDOS DA DBO E DQO PARA O ATERRO DE NOVA IGUAÇU

6.2.2 Resultados Obtidos e Discussão

O Moduelo 2 fornece dados diários de geração de metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2), hidrogênio (H_2), nitrogênio (N_2) e oxigênio (O_2) no aterro. Estes dados foram somados ano a ano de forma a gerar as Tabelas 6.9 e 6.10.

A Tabela 6.9 apresenta os volumes de gás gerado considerando somente os RSU, cuja composição gravimétrica foi apresentada no Capítulo 4 e cujo aporte não sofre acréscimos significativos nos anos analisados, já que o crescimento populacional é de 1,94% ao ano.

A Tabela 6.10 apresenta os volumes dos diferentes gases gerados, considerando o total de resíduos dispostos no aterro no período de 2003 a 2005. A composição gravimétrica utilizada é a mesma dos RSU, como já foi explicado anteriormente, porém a taxa de crescimento dos resíduos é muito superior, da ordem de 59%, devido ao aporte crescente de resíduos Classe IIA.

TABELA 6.9 GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU

Ano	CH_4 (m^3)	CO_2 (m^3)	H_2 (m^3)	N_2 (m^3)	O_2 (m^3)
2003	2.391.860	2.227.250	288.469	81.815	1.840
2004	7.216.140	6.680.410	734.341	96.676	2.236
2005	10.065.200	9.279.140	925.160	99.554	2.564
2006	12.092.000	11.112.300	1.026.670	102.404	2.857
2007	12.366.200	11.304.000	909.730	101.327	2.802

TABELA 6.10 – GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS

Ano	CH_4 (m^3)	CO_2 (m^3)	H_2 (m^3)	N_2 (m^3)	O_2 (m^3)
2003	1.987.440	1.840.480	216.663	78.378	1.757
2004	8.860.660	8.210.720	936.577	143.609	3.283
2005	19.054.700	17.599.000	1.851.140	233.269	6.526

A Figura 6.9 ilustra os valores apresentados na tabela 6.9, que considera somente a fração dos RSU e a Figura 6.10 apresenta a geração diária de gases para o período considerado.

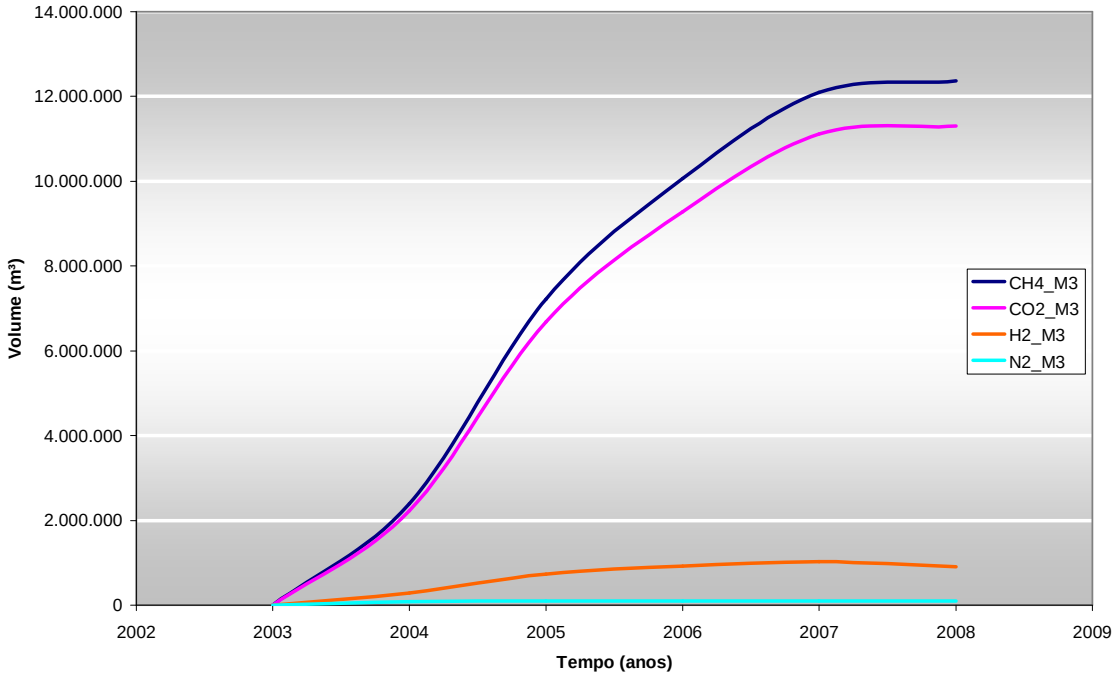


FIGURA 6.9 - GASES GERADOS ANUALMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU

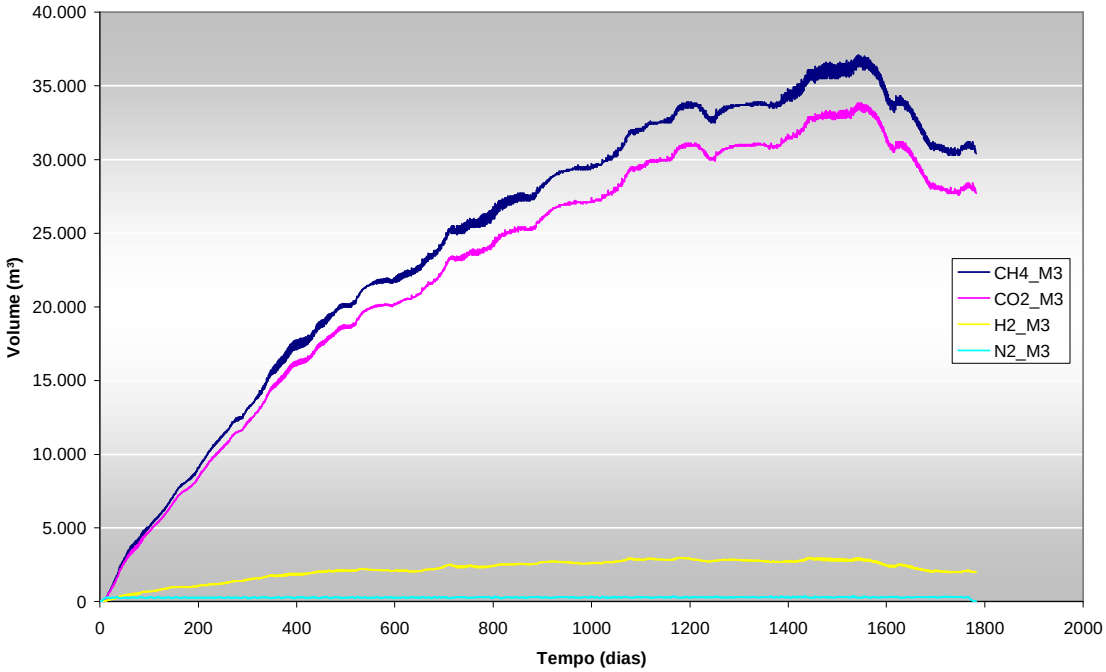


FIGURA 6.10 - GASES GERADOS DIARIAMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO SOMENTE OS RSU

O decréscimo na geração de gases evidenciada na Figura 6.10, deve-se ao encerramento progressivo das áreas de disposição de resíduos e à colocação de células de aterro selado, com maior espessura e grau de compactação, reduzindo assim o aporte de água ao aterro. Como já foi comentado no Capítulo 2 a umidade é um importante fator para a produção de biogás.

A Figura 6.11 representa os volumes dos componentes do biogás gerado anualmente considerando a totalidade dos resíduos dispostos, como apresentado na tabela 6.10, para o período de 2003 a 2005. Na Figura 6.12 é apresentada a geração diária dos principais componentes do biogás.

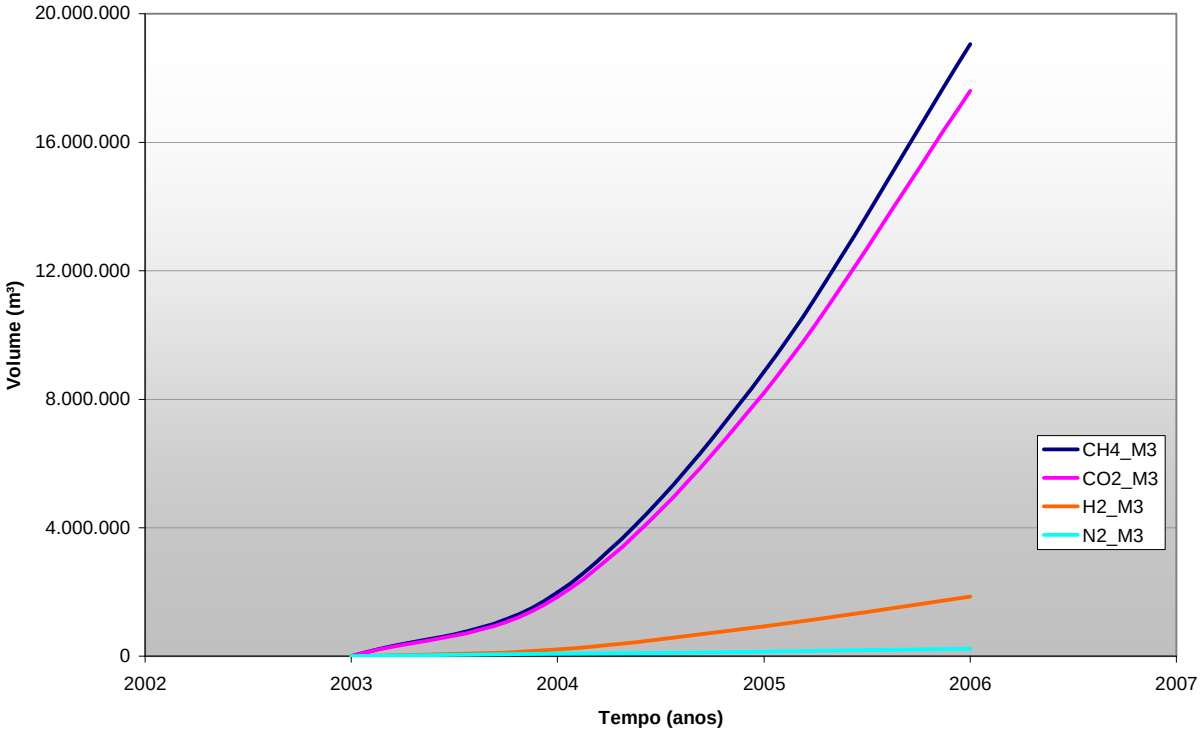


FIGURA 6.11 - GASES GERADOS NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS

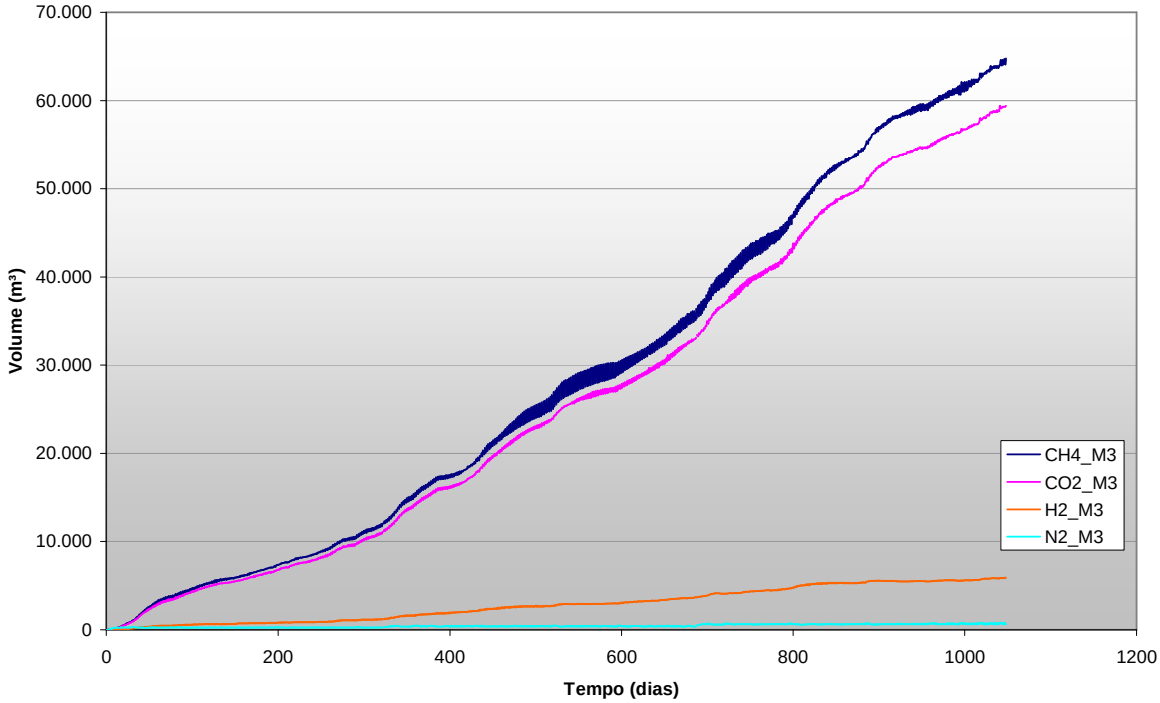


FIGURA 6.12 - GASES GERADOS DIARIAMENTE NO ATERRO CONSIDERANDO A TOTALIDADE DOS RESÍDUOS

Apresenta-se a seguir na Figura 6.13 a geração de CH_4 prevista para o período de investigação, considerando os parâmetros k e L_0 sugeridos pelas metodologias da USEPA, Banco Mundial e IPCC e os parâmetros k e L_0 de projeto, além da geração prevista na modelagem com Moduelo 2.

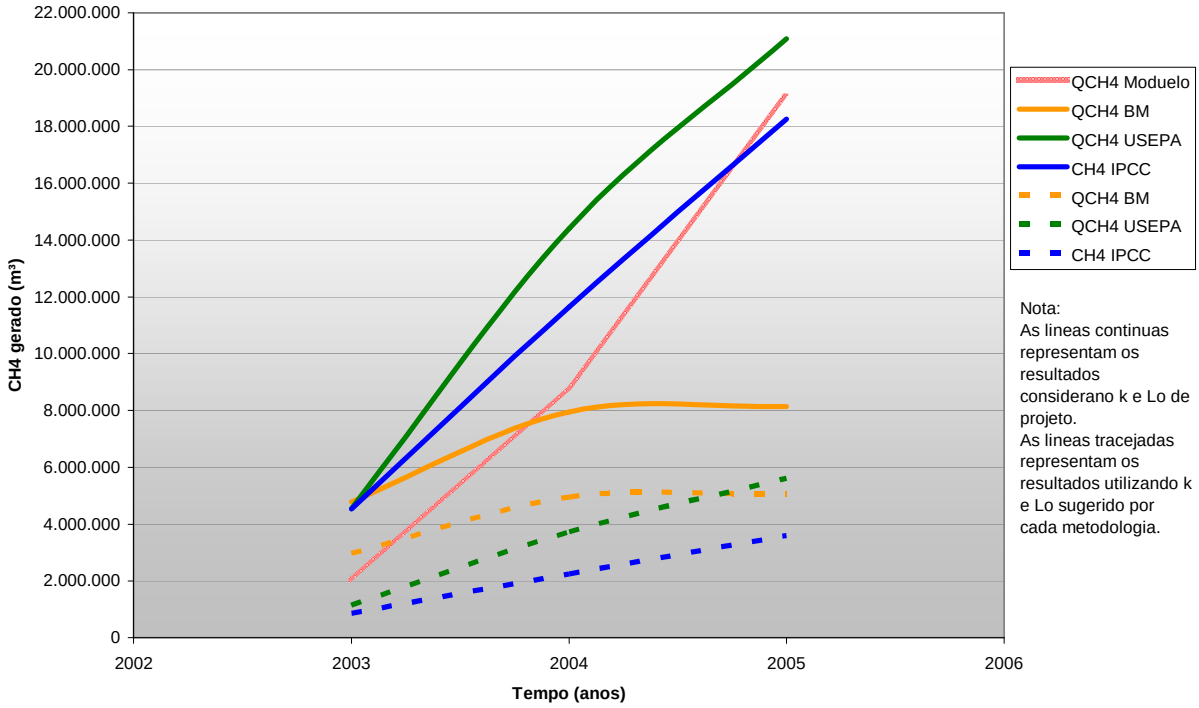


FIGURA 6.13 – GERAÇÃO DE CH_4 PREVISTA PARA O PERÍODO DE 2003 A 2005

Observa-se que considerando os valores k e L_0 de projeto, a geração de CH_4 fornecida pelo Moduelo 2 encontra-se num valor intermediário à geração prevista pelas metodologias da USEPA e IPCC, porém se considerarmos os parâmetros sugeridos por cada modelo (Tabela 6.1) a geração de metano prevista com Moduelo 2 é muito superior.

A avaliação destes resultados é dificultada pelo atual sistema de extração de biogás no aterro. Como já foi mencionado a utilização do biogás no evaporador de chorume faz parte da primeira fase do processo de aproveitamento e, até então, a rede de captação e drenagem é muito simples, estando ligada a apenas 20% dos drenos.

A Figura 6.14 apresenta a geração de CH_4 e CO_2 prevista com Moduelo 2 para os meses de Junho e Julho de 2005.

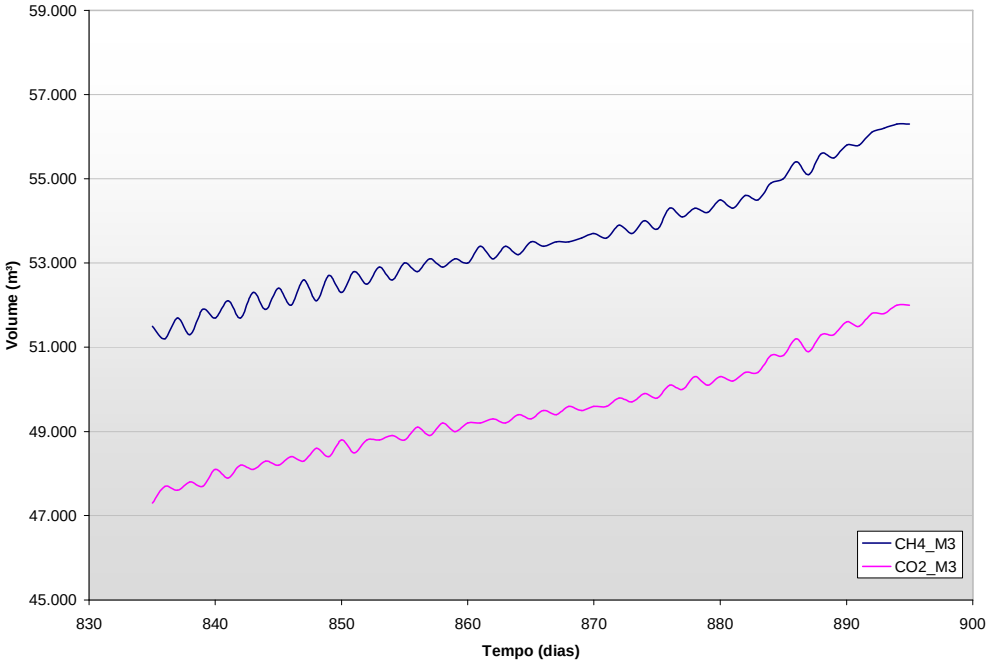


FIGURA 6.14 – GERAÇÃO DE BIOGÁS PREVISTA PELO MODUELO 2 NOS MESES DE JUNHO E JULHO DE 2005

Segundo informações do aterro, ao final do mês de julho de 2005 o evaporador consumia somente 10% do total de biogás estimado utilizando Moduelo 2 ou cerca de 40% da produção de biogás estimada pela metodologia do IPCC, que fornece o menor valor de geração para o ano 2005.

6.3 CONSIDERAÇÕES A RESPEITO DAS PREVISÕES REALIZADAS

O primeiro passo para uma previsão é determinar a situação de campo, tendo-a estabelecido o engenheiro a simplifica de forma a substituí-la num modelo. Nesse estágio do processo de predição, o engenheiro precisa determinar os mecanismos que serão envolvidos no futuro evento. Então seleciona o método e os parâmetros a serem utilizados e logo manipula os parâmetros com o método selecionado para obter a previsão, e finalmente a descreve, Lambe (1973).

Os dados de extração de gás do aterro de Nova Iguaçu não foram adequados para avaliar a precisão dos métodos analisados e parâmetros utilizados, como se pretendia em principio. Os resultados apresentados neste capítulo são previsões.

Lambe (1973), apresenta uma lista de importantes projetos em que previsões realizadas apresentam erros variando entre 39 e 391 %.

O autor classifica as previsões em quatro categorias apresentadas na Tabela 6.11 abaixo.

TABELA 6.11 – CLASSIFICAÇÃO DAS PREVISÕES

Tipo de Previsão	Quando as previsões foram realizadas	Resultados no período em que as previsões foram realizadas
A	Antes do evento	
B	Durante o evento	Desconhecidos
B1	Durante o evento	Conhecidos
C	Após o evento	Desconhecidos
C1	Após o evento	Conhecidos

FONTE: LAMBE, 1973

O estudo realizado no aterro de Nova Iguaçu resulta ser do tipo B, ocorrendo durante a conformação do aterro, o que possibilita a obtenção de dados como permeabilidade e características do solo utilizado, assim como dos resíduos, porém com resultados de geração total de gás desconhecidos.

As previsões realizadas com o Programa Moduelo 2 são quase quatro vezes superiores às previsões realizadas com os modelos da USEPA, BM e IPCC, quando considerados os parâmetros k e L_0 sugeridos por cada metodologia.

O modelo apresentado pelo BM é o que prevê as menores taxas de geração de biogás, mesmo quando considerados os parâmetros K e L_0 correspondentes a resíduos com características de alta degradabilidade, a geração obtida com este método é significativamente inferior à geração calculada com Moduelo 2.

Para os modelos do IPCC e da USEPA a manipulação dos parâmetros L_0 e K, de forma a considerar uma maior taxa de produção de gás por tonelada de resíduo e acelerar a velocidade de biodegradação, permitem alcançar os valores calculados pelo Moduelo 2. Porém não há como afirmar com os dados conhecidos, qual das previsões é a mais acertada.

A segunda fase de aproveitamento de biogás, que já começou a implantar-se no Lixão da Marambaia e brevemente será implantada no aterro de Nova Iguaçu, permitirá o ajuste dos parâmetros considerados e a determinação da metodologia mais adequada.

CAPÍTULO 7 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho teve como objetivo investigar as condições de produção de gás no aterro de Nova Iguaçu, visando avaliar os diferentes métodos utilizados atualmente para o calculo das emissões em aterros de resíduos.

Na análise realizada em cromatógrafo observa-se que a composição do biogás do aterro de Nova Iguaçu tem como características um alto percentual de metano (CH_4), com valores acima de 60 % e um baixo percentual de dióxido de carbono (CO_2), alcançando valores que não superam a 24%.

Segundo a metodologia da EPA a geração de metano no ano 2005 foi de 5.609.003 m³, valor similar ao encontrado utilizando o Método Scholl Cânion indicado pelo Banco Mundial de 5.059.432 m³. Estes valores, porém, são superiores aos encontrados utilizando a metodologia indicada pelo IPCC, que fornece um valor de 3.569.680 m³. Os valores obtidos através da modelagem com Moduelo 2 superam todas as previsões anteriores indicando para o ano de 2005 uma geração de metano de 19.054.700 m³.

A alteração da taxa e do potencial de geração de metano permite para as metodologias da USEPA e IPCC atingir previsões de geração de metano iguais ou superiores as encontradas utilizando Moduelo 2, o que demonstra a sensibilidade dos parâmetros.

É previsto um aumento da geração de biogás até o final de 2007, quando ocorrerá o encerramento do primeiro local de disposição da CTR Nova Iguaçu, tendo como conseqüência um decréscimo progressivo das emissões.

A geração de gases prevista pelo Moduelo 2 no período de junho a julho de 2005 apresentou valores muito superiores à fração utilizada no evaporador de chorume no mesmo período. Vale lembrar que o biogás não é conduzido totalmente ao evaporador sendo queimado pelos flares conectados aos drenos verticais, e ainda, tratando-se de um aterro em operação, devem ser consideradas perdas através da

camada de cobertura e decorrentes da própria operação do aterro. Talvez alguns parâmetros adotados não representem bem o fenômeno como um todo. Por tanto estas previsões são, segundo a classificação de Lambe, 1973, do tipo B, ou seja durante o processo de conformação do aterro e com resultados desconhecidos.

Quanto à avaliação dos métodos utilizados, pode-se concluir que a metodologia da IPCC utiliza um maior número de elementos se comparada com as metodologias sugeridas pelo Banco Mundial e pela EPA. Isto permite caracterizar de forma mais adequada o local estudado.

A metodologia de cálculo de emissões de gás para aterros do IPCC, no entanto não apresenta valores razoáveis para o estudo de aterros já encerrados, pois ao aplicar sua fórmula a multiplicação pela fração exponencial apresenta valores de emissão sempre crescente.

A metodologia apresentada pelo Banco Mundial representa de forma mais adequada aterros já encerrados.

Na aplicação do Moduelo 2, as dificuldades encontradas se referem ao detalhamento das informações necessárias, principalmente nas informações climáticas contendo não só informações diárias como horárias. Outra dificuldade apresentada, refere-se à composição gravimétrica dos resíduos, já que além do município não possuir tal estudo dos resíduos, o ingresso de resíduos Classe II A, de diversas origens e em quantidades que variam ano a ano, impedem uma classificação adequada. E finalmente a calibração do modelo de biodegradação requer dados de caracterização do chorume com uma periodicidade maior aos dados obtidos junto à administração do aterro.

O fato das caracterizações em cromatógrafo do biogás indicarem percentuais de CH_4 acima dos valores usualmente encontrados na literatura e valores de CO_2 inferiores, não foi caracterizado na modelagem com Moduelo 2, onde as quantidades de CH_4 no final de 2005 estão em torno de 54% e as de CO_2 em torno de 42%.

Sugestões para futuros trabalhos:

Com a finalidade de entender esta variação tão significativa nas frações de biogás, sugere-se para futuros trabalhos de pesquisa a realização de um estudo em lisímetro, verificando as fases de geração de gás para, assim, poder avaliar as diferenças nas proporções de CH4 e CO2 verificadas neste trabalho e apontadas em outros aterros do Rio de Janeiro.

Está sendo projetada a segunda fase de aproveitamento de biogás, onde a rede de captação será conectada a todos os drenos do aterro, e a proximidade do fim das operações nesse local permitirá a diminuição das perdas. Esta adequação do sistema permitirá extrair uma maior fração de biogás gerado e nesse sentido sugere-se um acompanhamento deste processo, de modo a verificar a margem de erro das previsões realizadas e a adequação dos parâmetros de forma a corrigir os cálculos.

CAPÍTULO 8 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABRELPE, (2005) **-** ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA URBANA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - Panorama de resíduos sólidos no Brasil. 180 p. Sao Paulo, SP.

AFFONSO, F. J. A, 2005, *Caracterização de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição (RCD) para uso em camadas drenantes de aterros de resíduos sólidos*. Tese de D. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, 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.* Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT – **Resíduos Sólidos Classificação** – NBR 10.004/2004. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT - **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos urbanos – Procedimento**, NBR 8.419. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Aterro de Resíduos Não Perigosos Sólidos – Critérios para Projeto, Implantação e Operação – NBR 13.896. Rio de Janeiro1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo – Determinação do Limite de Liquidez.** NBR 6459. Rio de Janeiro, out. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.** NBR 7180. Rio de Janeiro, out. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** NBR 6457. Rio de Janeiro, ago. 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo – Análise Granulométrica.** NBR 7181. Rio de Janeiro, dez. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica. NBR 6508. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável.** NBR 14545. Rio de Janeiro, jul. 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Solo – Determinação do coeficiente de permeabilidade de solos granulares a carga constante.** NBR 13292. Rio de Janeiro, 1995.

BANCO MUNDIAL, **Manual para a Preparação de Gás de Aterro Sanitário para Projetos de Energia na América Latina e Caribe**, 2003, disponível em: <http://www.bancomundial.org.ar/lfg/gas_access_po.htm> Acesso em 10/03/2005

BARBOSA, M. C. Resíduos sólidos urbanos, comportamento geotécnico. Notas de aula, PEC, COPPE, UFRJ, 2002.

BIRGEMER, H.G. & CRUTZEN, P.J., 1987, " The production of methane from solid wastes"*Journal of geophysical research*, v. 92, n°D2, pp 2181-2187.

BRAZ, J. A., SILVA, C. L., 2003, “Avaliação do Potencial Energético do Biogás de Aterro Sanitário gerado pelos Resíduos Sólidos Domésticos do Município de Rio Claro”. *21º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*.

BRITO FILHO, L. F., COSTA LEITE, L. E., MAHLER, C., “Avaliação do Potencial de Receitas Derivadas do Biogás de Aterros”. *23º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2004.

BRITO FILHO, L. F., 2005. “Estudo de Gases em Aterros. Casos: Nova Iguaçu e Terra Brava” dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.

CENTRO DE PREVISÃO DE TEMPO E ESTUDOS CLIMÁTICOS, (CPTEC) Capacidade de Campo, dinponível em: <http://www.cptec.inpe.br/products/proclima/Moni_NE/advert_uteis_bh.html>. Acesso em 3 setembro 2005.

CETESB - Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões Antrópicas de Gases de Efeito Estufa - Relatórios de Referência. Emissões de Metano no Tratamento e na Disposição de Resíduos. São Paulo, SP, 2002

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. *Inventário Estadual de Resíduos Domiciliares*. São Paulo, SP, 2004.

COMLURB (1999). Análise Gravimétrica do Lixo da Cidade do Rio de Janeiro, RJ.

COMLURB (2005). Caracterização Gravimétrica e Microbiológica dos Resíduos Sólidos Domiciliares do Município do Rio de Janeiro, RJ.

CTR NOVA IGUAÇU (2003). CENTRO DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS, ATERRO SANITÁRIO DE ADRIANÓPOLIS, Relatório Fotográfico.

EDEN, C. "Combined Landfill Gas and Leachate Extraction Systems" UKPS Ltd, The Barclay Centre Ltd, University of Warwick Science Park, July 1994

ENGECORPS - Corpo de Engenheiros Consultores (1996). Rel: 064-SS0-NOD-BI73. Estado da Arte dos Aterros Sanitários - Parte II, abril, 233p.

ENSINAS, A. V., 2003, *Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Delta em Campinas – SP*. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, Brasil.

GEORIO. **Dados Pluviométricos**, Rio de Janeiro, 2003 e 2004. Disponível: <http://www.rio.rj.gov.br/alertario/>. Acesso: 20 fev. 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT (1995). Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado. 2º ed. São Paulo: IPT/ CEMPRE, 278p. (IPT. Publicação, 2.163).

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC, 1996 a). Directrices del IPCC para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero, versión revisada (Vol 2). Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/spanish.htm> Acesso em: 20 março 2005

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE, (IPCC, 1996 b). Guidelines for National Greenhouse Inventories: Reference Manual (Vol.3). Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6> . Acesso em: 20 março 2005

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). Solid Waste Management and Wastewater Treatment" in Methodological and Technological issues in Technology Transfer, *1995,* disponível em <http://www.grida.no/climate/ipcc/tectran/255.htm> Acesso em: 13 março 2005

IPT. *Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado.* Instituto de Pesquisa Tecnológica do Estado de São Paulo S.A. Compromisso Empresarial para Reciclagem -CEMPRE, Publicação IPT 2622, 2 ed., 370p, São Paulo, 2000.

JUCA,J.F.T. e MACIEL, F.J.,1999. "Permeabilidade ao Gás de um Solo Compactado não Saturado", Anais do IV Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, São José dos Campos, São Paulo, pp 384-391

JUCA,J.F.T.,MONTEIRO, V.E.D., OLIVEIRA, F.J.S., MACIEL, F.J.,1999. "Monitoramento Ambiental do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca", III Seminário de Resíduos Sólidos Urbanos, Toledo, Paraná.

JUNQUEIRA F.F., 2000, Análise de Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno-Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência o Aterro do Jóquei Clube, Tese de Doutorado, UNB, pp283.

LAMBE, T. W., 1973, Predictions in Soil Engineering, Géotechnique 23, Nº. 2, pág 149-202

LIMA, L.M.Q , 1995. *Lixo Tratamento e Biorremediação*, 3 ed., Hemus.

LOBO, A., 2003, *Desarrollo de MODUELO 2: Herramienta para la Evaluación de la Contaminación Producida en Vertederos de Residuos Sólidos Urbanos*. Tesis Doctoral, Universidad de Cantabria, Santander, España.

MACIEL, F. J., 2003, *Estudo da Geração, Percolação e Emissão de Gases no Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca/Pe*. Tese M.Sc**.,** Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil.

MAHLER, C. F. & OLIVEIRA, F. J. P. (1997). Proposta de monitoramento ambiental para operação de aterros sanitários. I Congreso paraguayo de ingenieria geotécnica, Asunción, Paraguay, pp. 453-465.

McBEAN, E.A., ROVERS, F.A., FARQUHAR, G.J., “Solid Waste Landfill Engineering and Design”.Prentice Hall, Inc. p. 521, ISBN 0-13-079187-3. 1995.

MONTEIRO, V. E. D., 2003, *Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca*. Tese de D. Sc, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

OLIVEIRA, M. B. de, 2005, *Análise do Desempenho de Equações de Infiltração e de Métodos de Determinação da Capacidade de Campo para Solos em uma Bacia Hidrográfica de São José de Ubá*. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.

PEREIRA, A. G. H., 2000, *Compresibilidad de los residuos sólidos urbanos*. Tesis Doctoral, Universidad de Oviedo, Espana.

PNSB, (2000). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

PROSAB, (2003). Resíduos Sólidos Urbanos: Aterro Sustentável para Municípios de Pequeno Porte. Florianópolis, SC.

QIAN, X., KOEMER, R. M., GRAY, D.H., 2002, “Gas Collection and Control Systems”. Geotechnical Aspects of Landfill Design and Construction, New Jersey, Prentice Hall.

REAL, J. L. G., 2005, *Riscos Ambientais em Aterros de Resíduos Sólidos com Ênfase na Emissão de Gases*. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.

REICHARDT, K., 1990. *A Água em Sistemas Agricolas. Editora.* Manole Ltda. São Paulo, SP, 188p.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E., TOPP, G. C., 1983, *A Reexamination of the Constant Head Well Permeameter Method for Measuring Saturated Hydraulic Conductivity Above the Water Table*. Soil Science, 136-250-268.

REYNOLDS, W. D., ELRICK, D. E., CLOTHIER, B. E., 1985, *The Constant Head Well Permeameter: Effect of Unsaturated Flow*. Soil Science, Baltimore, v.139, n.2, p.172-180.

SILVEIRA, A. M. de M.,2004, *Estudo do Peso Específico de Resíduos Sólidos Urbanos*. Dissertação de M. Sc, Programa de Engenharia Civil /COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro.

SOUSA PINTO, C., 2000. *Curso Básico de Mecânica dos Solos em 16 Aulas*, São Paulo, Oficina de Textos.

TCHBANOGLOUS, G., THESSEN, H., VIGIL, S. A., 1994, "Composicion y Caracteristicas, Generacion, Movimento y Control de los Gases de Vertedoro". *Gestion Integral de Resíduos Sólidos*, v. 1, Mc Graw Hill.

TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H. & VINIL, S. Integrated solid waste management. Engineering principles and management issues. Irwin MacGraw-Hill. 1993. 978p.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), AP 42 Section 2.4 – Municipal Solid Waste Landfills, Related Information (1996), disponível em**: <**http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch02/related/c02s04.html.**>** Accesso em 15 março 2005

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), Municipal Solid Waste Landfills,(1998) (Fórmula) .disponível em**: <**http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/ch02/final/c02s04.pdf.**>** Accesso em 21 março 2005

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), Emerging Technologies for the Management and Utilization of Landfill Gas, USA, Janeiro 1998, disponível: <www.epa.gov/ttn/catc/dir1/etech_pd.pdf>. Acesso: 3 abr. 2005.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA), Aire y Radiación <www.epa.gov/air/espanol/calentamiento_global/what.html>, Acesso: 10 fev. 2006.

ANEXO 1 - CÁLCULO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS POR HABITANTE NO MUNICÍPIO DE NOVA IGUAÇU E INDICADORES

CÁLCULO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS PERCAPTA PARA O ANO DE 2003		
População (hab)	799.540	**Fonte: IBGE**
População atendida pela coleta (85%)	679.609	**Fonte: EMLURB**
Resíduo domiciliar coletado (ton)	132.598,16	**Fonte: EMLURB**
Período de coleta considerdo (dias)	322	
Geração percapta (kg)	0,61	

Indicadores	**Bangu (1)**	**Nova Iguaçu (2)**
IDH	**0,805**	**0,762**
Renda per-capta	**R$ 227,00**	**R$ 237,50**

Fontes:

(1) www.armazenamentodedados.rio.rj.gov.br

(2) www.novaiguacu.rj.gov.br

ANEXO 2 - CARACTERIZAÇÃO GRANULOMÉTRICA

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO CONJUNTO COM SEDIMENTAÇÃO

Amostra:	1 - SOLO AMARELO				Prof.:		
Local:	NOVA IGUAÇU						
Aluno(a):	SILVIA - MARIA ALICE	Operador:	LCARLOS	Visto:		Data:	3/10/2005

		Umidade Higroscópica				Densidade Real dos Grãos			
		Cápsula nº	100	16	14	Temperatura (ºC)	24		
Amostra total úmida (g)	1220,00	Peso Cápsula (g)	19,01	19,03	19,27	Picnômetro nº	A	B	D
Retida acumulada nº 10 (g)	72,84	Cápsula e solo úmido (g)	115,93	108,31	107,55	Picnômetro (g)	110,23	90,41	99,25
Passando nº 10 úmida (g)	1147,16	Cápsula e solo seco (g)	114,34	106,83	106,12	Pic + Solo Seco (g)	180,31	160,72	169,74
Passando nº 10 seca (g)	1128,35	Água (g)	1,59	1,48	1,43	Pic + Água (g)	601,56	592,20	593,76
Água (g)	18,81	Solo seco (g)	95,33	87,80	86,85	Pic + Solo + Água (g)	645,16	635,92	637,60
Amostra total seca (g)	1201,19	Umidade higroscópica (%)	1,67	1,69	1,65	Solo Seco (g)	70,08	70,31	70,49
		Média h (%)	1,667			Fator de Correção (K)	0,9973		
OBS.:		Fc = 100/(100+w)	0,9836			Densidade Real (Gs)	2,639	2,637	2,638
						Média	2,638		

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL

Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,1
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,4
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,1
3/8 pol	3,88	0,32	0,32	99,68	9,5
Nº 4	14,28	0,85	1,17	98,83	4,8
Nº 8	50,13	2,94	4,11	95,89	2,36
Nº 10	72,84	1,86	5,97	94,03	2,0

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL

Amostra parcial úmida (g): 70,30				Amostra parcial seca (g): 69,15		
Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
20	12,47	18,03	18,03	81,97	77,07	0,85
30	19,92	10,77	28,81	71,19	66,94	0,60
40	24,52	6,65	35,46	64,54	60,69	0,42
60	30,85	9,15	44,61	55,39	52,08	0,25
100	35,21	6,31	50,92	49,08	46,15	0,15
200	39,24	5,83	56,75	43,25	40,67	0,074

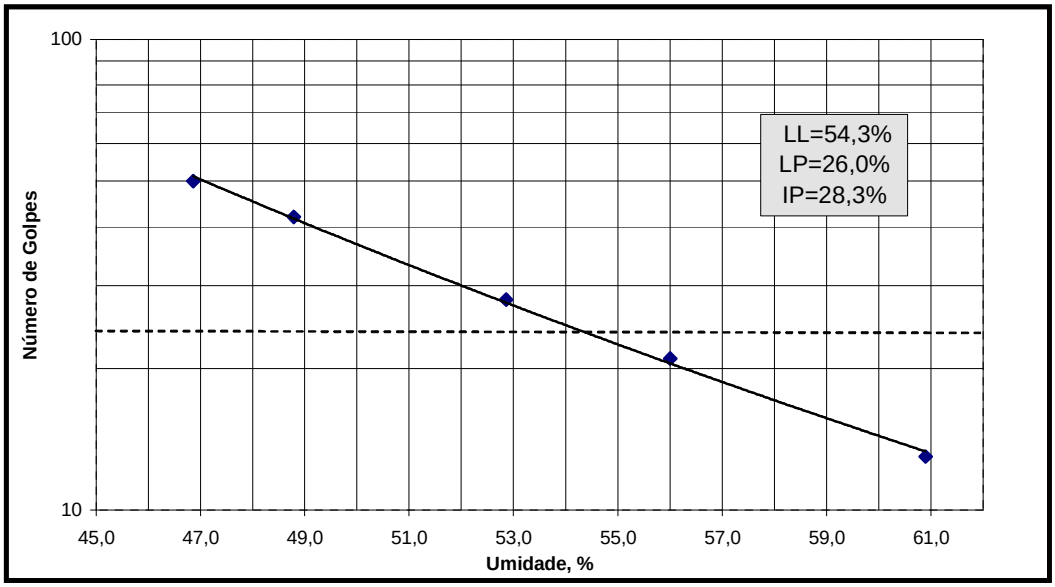
SEDIMENTAÇÃO

Massa específica real (g/cm3):	2,638					Densímetro Nº		**COPPE 1**
Seção da proveta (cm2):	27,12							
Data	Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura ºC	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosida (g.s/cm2)	Altura de queda(cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
	0,5	1,0200	23	1,0018	0,0182	9,56E-06	13,51	0,0688	39,71
	1	1,0190	23	1,0018	0,0172	9,56E-06	13,71	0,0490	37,52
	2	1,0180	23	1,0018	0,0162	9,56E-06	13,90	0,0349	35,34
	5	1,0175	23	1,0018	0,0157	9,56E-06	12,70	0,0211	34,24
	10	1,0170	23	1,0018	0,0152	9,56E-06	12,80	0,0150	33,15
	20	1,0160	23	1,0018	0,0142	9,56E-06	13,00	0,0107	30,96
	40	1,0150	23	1,0018	0,0132	9,56E-06	13,19	0,0076	28,78
	80	1,0140	23	1,0018	0,0122	9,56E-06	13,39	0,0054	26,59
	240	1,0130	23	1,0018	0,0112	9,56E-06	13,59	0,0032	24,41
	1440	1,0120	23	1,0018	0,0102	9,56E-06	13,78	0,0013	22,22

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		G5	5	G	4	C
PESO (g)	Total Úmido	8,53	14,93	15,83	9,45	10,14
	Total Seco	8,02	14,38	15,16	8,65	9,30
	Cápsula	6,02	12,23	12,62	5,58	6,11
	Água	0,51	0,55	0,67	0,80	0,84
	Solo Seco	2,00	2,15	2,54	3,07	3,19
Umidade (%)		25,50	25,58	26,38	26,06	26,33
Limite de Plasticidade		25,97				

LIMITE DE LIQUIDEZ										
Número de Golpes		50		42		28		21		13	
Número da Cápsula		821	36	07	33	30	13	L13	105	40	06
PESO (g)	Total Úmido	13,28	14,27	11,95	13,86	11,90	14,40	9,58	9,03	13,10	14,50
	Total Seco	11,64	12,70	10,57	11,89	10,39	12,96	7,85	7,50	11,33	12,75
	Cápsula	8,14	9,35	7,75	7,84	7,56	10,21	4,77	4,76	8,42	9,88
	Água	1,64	1,57	1,38	1,97	1,51	1,44	1,73	1,53	1,77	1,75
	Solo Seco	3,50	3,35	2,82	4,05	2,83	2,75	3,08	2,74	2,91	2,87
Umidade (%)		46,9	46,9	48,9	48,6	53,4	52,4	56,2	55,8	60,8	61,0
Umidade Média (%)		46,9		48,8		52,9		56,0		60,9	



COPPE/UFRJ	**PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL**	
ALUNA: MARIA ALICE - SILVIA	**LAB. DE GEOTECNIA - SETOR DE CARACTERIZAÇÃO**	
MESTRANDO:	**AMOSTRA:** 1 - SOLO AMARELO	
OPERADOR: Lcarlos	NOVA IGUAÇU	
RECEBIDO EM ___/___/___	**DATA:** 3/10/2005	**REG.LAB.**

ANÁLISE GRANULOMÉTRICA POR PENEIRAMENTO CONJUNTO COM SEDIMENTAÇÃO

Amostra:	2 - SOLO VERMELHO			Prof.:	
Local:	NOVA IGUAÇU				
Aluno(a):	SILVIA - MARIA ALICE	Operador:	LCARLOS	Visto:	Data: 3/10/2005

		Umidade Higroscópica				Densidade Real dos Grãos			
		Cápsula nº	I	B	4	Temperatura (ºC)	24		
Amostra total úmida (g)	1320,00	Peso Cápsula (g)	13,88	16,08	13,88	Picnômetro nº	1	2	G
Retida acumulada nº 10 (g)	64,13	Cápsula e solo úmido (g)	97,34	98,91	110,28	Picnômetro (g)	106,46	110,02	131,58
Passando nº 10 úmida (g)	1255,87	Cápsula e solo seco (g)	96,55	98,10	109,36	Pic + Solo Seco (g)	176,67	180,08	201,94
Passando nº 10 seca (g)	1243,82	Água (g)	0,79	0,81	0,92	Pic + Água (g)	600,35	603,21	621,51
Água (g)	12,05	Solo seco (g)	82,67	82,02	95,48	Pic + Solo + Água (g)	644,12	646,93	665,37
Amostra total seca (g)	1307,95	Umidade higroscópica (%)	0,96	0,99	0,96	Solo Seco (g)	70,21	70,06	70,36
		Média h (%)	0,969			Fator de Correção (K)	0,9973		
OBS.:		Fc = 100/(100+w)	0,9904			Densidade Real (Gs)	2,648	2,653	2,648
						Média	2,650		

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA TOTAL

Peneira nº	Material retido			% que passa da amostra total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra total	% acumulada		
1 1/2 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	38,1
1 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	25,4
3/4 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	19,1
3/8 pol	0,00	0,00	0,00	100,00	9,5
Nº 4	5,68	0,43	0,43	99,57	4,8
Nº 8	37,95	2,44	2,88	97,13	2,36
Nº 10	64,13	1,98	4,86	95,14	2,0

PENEIRAMENTO DA AMOSTRA PARCIAL

Amostra parcial úmida (g): *70,40* — Amostra parcial seca (g): 69,72

Peneira nº	Material retido			% passa amost. parc.	% passa amost. total	Peneira (mm)
	Peso acumulado (g)	% amostra parcial	% acumulada			
20	13,16	18,87	18,87	81,13	77,18	0,85
30	19,59	9,22	28,10	71,90	68,41	0,60
40	23,69	5,88	33,98	66,02	62,82	0,42
60	29,78	8,73	42,71	57,29	54,51	0,25
100	37,82	11,53	54,24	45,76	43,53	0,15
200	40,22	3,44	57,68	42,32	40,26	0,074

SEDIMENTAÇÃO

Massa específica real (g/cm3): 2,650 — Densímetro Nº **COPPE 1**

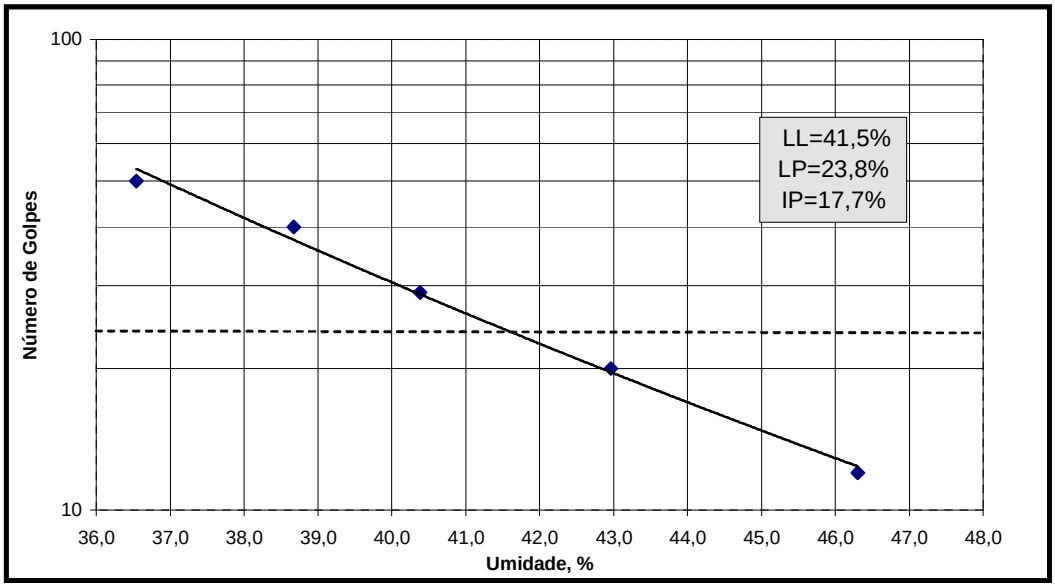
Seção da proveta (cm2): 27,12

Data	Tempo (min)	Leitura do Densímetro	Temperatura ºC	Leitura em Meio Dispersor	Leitura Corrigida	Viscosida (g.s/cm2)	Altura de queda(cm)	Diâmetro (mm)	% amost. total
	0,5	1,0200	23	1,0018	0,0182	9,56E-06	13,51	0,0686	39,74
	1	1,0180	23	1,0018	0,0162	9,56E-06	13,90	0,0492	35,37
	2	1,0170	23	1,0018	0,0152	9,56E-06	14,10	0,0350	33,18
	5	1,0160	23	1,0018	0,0142	9,56E-06	13,00	0,0213	30,99
	10	1,0145	23	1,0018	0,0127	9,56E-06	13,29	0,0152	27,71
	20	1,0133	23	1,0018	0,0115	9,56E-06	13,53	0,0109	25,08
	40	1,0120	23	1,0018	0,0102	9,56E-06	13,78	0,0077	22,24
	80	1,0105	23	1,0018	0,0087	9,56E-06	14,08	0,0055	18,96
	240	1,0090	23	1,0018	0,0072	9,56E-06	14,38	0,0032	15,68
	1440	1,0070	23	1,0018	0,0052	9,56E-06	14,77	0,0013	11,30

LIMITES DE ATTERBERG

LIMITE DE PLASTICIDADE						
Número da Cápsula		A2	Q5	B3	10A	F4
PESO (g)	Total Úmido	17,12	14,86	9,81	9,67	11,04
	Total Seco	16,37	14,31	9,08	9,16	10,37
	Cápsula	13,23	12,05	5,96	6,97	7,57
	Água	0,75	0,55	0,73	0,51	0,67
	Solo Seco	3,14	2,26	3,12	2,19	2,80
Umidade (%)		23,89	24,34	23,40	23,29	23,93
Limite de Plasticidade		23,77				

LIMITE DE LIQUIDEZ											
Número de Golpes		50		40		29		20		12	
Número da Cápsula		A	40	N	X	110	032	36	21	44	40
PESO (g)	Total Úmido	11,36	17,39	14,98	12,56	15,06	12,18	12,08	12,40	11,84	11,43
	Total Seco	10,27	15,89	13,09	11,31	13,67	11,08	10,74	10,99	10,45	10,07
	Cápsula	7,32	11,74	8,20	8,08	10,26	8,33	7,56	7,77	7,42	7,16
	Água	1,09	1,50	1,89	1,25	1,39	1,10	1,34	1,41	1,39	1,36
	Solo Seco	2,95	4,15	4,89	3,23	3,41	2,75	3,18	3,22	3,03	2,91
Umidade (%)		36,9	36,1	38,7	38,7	40,8	40,0	42,1	43,8	45,9	46,7
Umidade Média (%)		36,5		38,7		40,4		43,0		46,3	



COPPE/UFRJ	**PROGRAMA DE ENGENHARIA CIVIL**	
ALUNA: MARIA ALICE - SILVIA	**LAB. DE GEOTECNIA - SETOR DE CARACTERIZAÇÃO**	
MESTRADO:	**AMOSTRA:** 2 - SOLO VERMELHO NOVA IGUAÇU	
OPERADOR: Lcarlos		
RECEBIDO EM ___/___/___	**DATA:** 3/10/2005	**REG.LAB.**

ANEXO 3 - ENSAIOS DE PERMEABILIDADE

ENSAIO DE PERMEABILIDADE K_V- CARGA VARIÁVEL

Solo Vermelho

Amostra *cilindro 4*

	UMIDADE INICIAL		UMIDADE FINAL	
CÁPSULA Nº			*C3*	*F7*
PESO DA CÁPSULA (g)			*18,8*	*19,8*
CÁPSULA + SOLO ÚMIDO (g)			*91,6*	*88,5*
CÁPSULA + SOLO SECO (g)			*76,2*	*72,5*
PESO DE ÁGUA (g)			*15,4*	*16,0*
PESO DE SOLO SECO (g)			*57,4*	*52,7*
UMIDADE (%)			*26,8*	*30,0*
UMIDADE MÉDIA (%)			*28,4*	

CARACTERÍSTICA DO ENSAIO	DIÂMETRO C.P. (cm)	D	*3,58*
	ÁREA C.P. (cm²)	A	*10,06*
	ALTURA INICIAL C.P. (cm)	L	*9,00*
	VOLUME C.P. (cm³)	V	*90,59*
	ÁREA DO TUBO (cm²)	a	*0,716*
CARACTERÍSTICA DO SOLO	TARA + SOLO ÚMIDO (g)		*551,25*
	TARA (g)		*399,92*
	SOLO SECO (g)	Ws	108,40
	DENSIDADE DOS GRÃOS	Gs	*2,65*
	VOLUME SÓLIDOS (cm³)	Vs	*40,91*
	ÍNDICE DE VAZIOS	e	*1,21*

L E I T U R A							
CARGA INICIAL (cm)	h_0	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*
CARGA FINAL (cm)	h_t	*122,9*	*113,9*	*103,9*	*93,9*	*123,9*	*113,9*
TEMPO DECORRIDO (s)	t	*300*	*627*	*1.036*	*1.512*	*330,0*	*709,0*
TEMPERATURA DA ÁGUA	T	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,80*	*23,80*
FATOR DE CORREÇÃO	R_T	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*
PERMEABILIDADE (cm/s)	k	*3,6E-05*	*3,2E-05*	*3,1E-05*	*2,9E-05*	*2,9E-05*	*2,8E-05*
PERMEABILIDADE MÉDIA (cm/s)	k_M	*3,39E-05*		*2,99E-05*		*2,89E-05*	

$$k = 2{,}3 \times \frac{a \times L \times R_T}{A \times t} \times \log\left(h_0 / h_f\right) \qquad V_s = \frac{W_s}{G_s} \qquad e = \frac{V - V_s}{V_s}$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{\text{viscosidade da água a T℃}}{\text{viscosidade da água a 20℃}}$$

COPPE / UFRJ	**Programa de Engenharia Civil Área: Geotecnia Ambiental**
Tese de Mestrado	SILVIA MARY PEREIRA BORBA
REFERÊNCIA: Solo de cobertura CTR Nova Iguaçú	
	Data: 10/10/2005

ENSAIO DE PERMEABILIDADE K_h- CARGA VARIÁVEL

Solo Vermelho

cilindro 2

	UMIDADE INICIAL		UMIDADE FINAL	
CÁPSULA Nº	I_{13}	G_8	3C	2G
PESO DA CÁPSULA (g)	13,9	13,8	14,8	14,9
CÁPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	79,1	90,8	80,7	67,4
CÁPSULA + SOLO SECO (g)	67,8	77,2	67,4	56,9
PESO DE ÁGUA (g)	11,2	13,6	13,3	10,5
PESO DE SOLO SECO (g)	53,9	63,4	52,6	42,0
UMIDADE (%)	20,9	21,4	25,3	24,9
UMIDADE MÉDIA (%)	21,2		25,1	

CARACTERÍSTICA DO ENSAIO	DIÂMETRO C.P. (cm)	D	4,08
	ÁREA C.P. (cm²)	A	13,07
	ALTURA INICIAL C.P. (cm)	L	8,98
	VOLUME C.P. (cm³)	V	117,40
	ÁREA DO TUBO (cm²)	a	0,307
CARACTERÍSTICA DO SOLO	TARA + SOLO ÚMIDO (g)		401,10
	TARA (g)		180,65
	SOLO SECO (g)	Ws	169,45
	DENSIDADE DOS GRÃOS	Gs	2,64
	VOLUME SÓLIDOS (cm³)	Vs	63,94
	ÍNDICE DE VAZIOS	e	0,84

LEITURA							
CARGA INICIAL (cm)	h_0	133,9	133,9	133,9	133,9	133,9	133,9
CARGA FINAL (cm)	h_t	128,9	123,9	113,9	103,9	123,9	113,9
TEMPO DECORRIDO (s)	t	198	418	945	1.614	470,0	1.020,0
TEMPERATURA DA ÁGUA	T	23,8	23,8	23,8	23,8	23,80	23,80
FATOR DE CORREÇÃO	R_T	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195	0,195
PERMEABILIDADE (cm/s)	k	7,9E-06	7,6E-06	7,0E-06	6,5E-06	6,8E-06	6,5E-06
PERMEABILIDADE MÉDIA (cm/s)	k_M	7,76E-06		6,75E-06		6,65E-06	

$$k = 2{,}3 \times \frac{a \times L \times R_T}{A \times t} \times \log\left(h_0 / h_f\right) \qquad V_s = \frac{W_s}{G_s} \qquad e = \frac{V - V_s}{V_s}$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{\text{viscosidade da água a T℃}}{\text{viscosidade da água a 20℃}}$$

OBS: retirada da amostra indeformada no sentido horizontal

COPPE / UFRJ	**Programa de Engenharia Civil Área: Geotecnia Ambiental**
Tese de Mestrado	SILVIA MARY PEREIRA BORBA
REFERÊNCIA: Solo de cobertura CTR Nova Iguaçú	
	Data: 10/10/2005

ENSAIO DE PERMEABILIDADE K_V- CARGA VARIÁVEL

Solo Amarelo

cilindro 3

	UMIDADE INICIAL		UMIDADE FINAL	
CÁPSULA Nº	1A	*2Z*	*2G*	*15A*
PESO DA CÁPSULA (g)	*14,1*	*13,9*	*12,6*	*19,8*
CÁPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	89,7	79,2	*65,9*	*74,5*
CÁPSULA + SOLO SECO (g)	*75,2*	*68,5*	*55,3*	*64,7*
PESO DE ÁGUA (g)	*14,5*	*10,7*	*10,6*	*9,8*
PESO DE SOLO SECO (g)	*61,1*	*54,6*	*42,8*	*44,9*
UMIDADE (%)	*23,7*	*19,6*	*24,9*	*21,8*
UMIDADE MÉDIA (%)	*21,7*		*23,4*	

CARACTERÍSTICA DO ENSAIO	DIÂMETRO C.P. (cm)	D	*4,08*
	ÁREA C.P. (cm²)	A	*13,07*
	ALTURA INICIAL C.P. (cm)	L	*8,98*
	VOLUME C.P. (cm³)	V	*117,37*
	ÁREA DO TUBO (cm²)	a	*0,139*
CARACTERÍSTICA DO SOLO	TARA + SOLO ÚMIDO (g)		*568,92*
	TARA (g)		*399,68*
	SOLO SECO (g)	Ws	131,15
	DENSIDADE DOS GRÃOS	Gs	*2,64*
	VOLUME SÓLIDOS (cm³)	Vs	*49,68*
	ÍNDICE DE VAZIOS	e	*1,36*

L E I T U R A							
CARGA INICIAL (cm)	h_0	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	
CARGA FINAL (cm)	h_t	*132,9*	*131,9*	*130,9*	*129,9*	*129,2*	
TEMPO DECORRIDO (s)	t	*1.010*	*2.042*	*3.014*	*4.146*	*4.984,0*	
TEMPERATURA DA ÁGUA	T	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,80*	
FATOR DE CORREÇÃO	R_T	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	
PERMEABILIDADE (cm/s)	k	*1,4E-07*	*1,4E-07*	*1,4E-07*	*1,4E-07*	*1,3E-07*	
PERMEABILIDADE MÉDIA (cm/s)	k_M	*1,38E-07*		*1,38E-07*		*1,33E-07*	

$$k = 2{,}3 \times \frac{a \times L \times R_T}{A \times t} \times \log\left(h_0 / h_f\right) \qquad V_s = \frac{W_s}{G_s} \qquad e = \frac{V - V_s}{V_s}$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{\text{viscosidade da água a T℃}}{\text{viscosidade da água a 20℃}}$$

COPPE / UFRJ	**Programa de Engenharia Civil Área: Geotecnia Ambiental**
Tese de Mestrado	SILVIA MARY PEREIRA BORBA
REFERÊNCIA: Solo de cobertura CTR Nova Iguaçú	
	Data: 10/10/2005

ENSAIO DE PERMEABILIDADE K_h- CARGA VARIÁVEL

Solo Amarelo

cilindro 4

	UMIDADE INICIAL		UMIDADE FINAL	
CÁPSULA Nº	I-15			
PESO DA CÁPSULA (g)	*13,5*			
CÁPSULA + SOLO ÚMIDO (g)	105,7			
CÁPSULA + SOLO SECO (g)	*86,8*			
PESO DE ÁGUA (g)	*18,9*			
PESO DE SOLO SECO (g)	*73,3*			
UMIDADE (%)	*20,5*			
UMIDADE MÉDIA (%)				

CARACTERÍSTICA DO ENSAIO	DIÂMETRO C.P. (cm)	D	*3,58*
	ÁREA C.P. (cm²)	A	*13,55*
	ALTURA INICIAL C.P. (cm)	L	*9,00*
	VOLUME C.P. (cm³)	V	*90,59*
	ÁREA DO TUBO (cm²)	a	*0,716*
CARACTERÍSTICA DO SOLO	TARA + SOLO ÚMIDO (g)		*405,70*
	TARA (g)		*177,60*
	SOLO SECO (g)	Ws	169,13
	DENSIDADE DOS GRÃOS	Gs	*2,64*
	VOLUME SÓLIDOS (cm³)	Vs	*64,06*
	ÍNDICE DE VAZIOS	e	*0,41*

L E I T U R A							
CARGA INICIAL (cm)	h_0	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*	*133,9*
CARGA FINAL (cm)	h_t	*92,3*	*92,3*	*93,0*	*92,9*	*92,3*	*93,5*
TEMPO DECORRIDO (s)	t	*41,57*	*41,19*	*40,88*	*41,02*	*40,15*	*40,45*
TEMPERATURA DA ÁGUA	T	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,8*	*23,80*	*23,80*
FATOR DE CORREÇÃO	R_T	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*	*0,195*
PERMEABILIDADE (cm/s)	k	*8,3E-04*	*8,4E-04*	*8,3E-04*	*8,3E-04*	*8,6E-04*	*8,24E-04*
PERMEABILIDADE MÉDIA (cm/s)	k_M	*8,32E-04*		*8,26E-04*		*8,41E-04*	

$$k = 2{,}3 \times \frac{a \times L \times R_T}{A \times t} \times \log\left(h_0 / h_f\right) \qquad V_s = \frac{W_s}{G_s} \qquad e = \frac{V - V_s}{V_s}$$

$$R_T = \frac{\mu_T}{\mu_{20}} = \frac{\text{viscosidade da água a T℃}}{\text{viscosidade da água a 20℃}}$$

COPPE / UFRJ	**Programa de Engenharia Civil Área: Geotecnia Ambiental**
Tese de Mestrado	SILVIA MARY PEREIRA BORBA
REFERÊNCIA: Solo de cobertura CTR Nova Iguaçú	
	Data: 10/10/2005

ENSAIO DE PERMEABILIDADE Kh- CARGA CONSTANTE

Solo Amarelo

Amostra : *CTR Nova Iguaçu*

Características do solo

Peso em gramas	Cápsula+ solo (úmido)	*68,39*
	Peso da cápsula I-14	*13,50*
	Cápsula+ solo (seco)	*57,25*
	Água	*54,89*
	Solo seco	*43,75*
G_s	Densidade real dos grãos	*2,65*
	Umidade (%)	*0,20*

Características do corpo de prova C.P.3

Diâmetro cm	D	*4,08*
Área cm^2	A	*13,07*
Volume cm^3	V	*117,40*
Tara + solo úmido (g)		*568,92*
Tara (g)		*399,68*
Solo seco (g)	Ws	*125,97*
Volume de sólidos W_s/G_s (cm^3)	V_s	*47,75*
Índice de vazios inicial	e	*1,46*

Ensaio carga constante		*1*		*2*		*3*	
Altura do corpo de prova cm	L	*8,98*		*8,98*		*8,98*	
Perda de carga (h_1 - h_2) cm	h	*164,5*	*164,5*	*164,5*	*164,5*	*164,5*	*100,0*
Volume de água percolada cm^3	Q	*131,0*	*172,0*	*172,0*	*171,5*	*171,0*	*172,5*
Tempo decorrido (segundos)	t	*60,0*	*60,0*	*60,0*	*60,0*	*60,0*	*60,0*
Temperatura da água ℃	T	*23,8*	*22,2*	*22,2*	*22,2*	*22,2*	*22,2*
Fator de correção	R_T	*0,20*	*0,20*	*0,20*	*0,20*	*0,20*	*0,20*
Coeficiente de permeabilidade	k	*1,8E-03*	*2,3E-03*	*2,3E-03*	*2,3E-03*	*2,3E-03*	*3,9E-03*
20℃ (cm/s)	média	*2,49E-03*					

R_T = Fator de correção para a viscosidade da água a 20℃

$$k_{20} = \frac{Q \times L_1 \times R_T}{h \times A \times t}$$

caso não sejam usados os níveis piezométricos, toma-se L_1 = L e h é

medido desde o nível do reservatório de água até o nível inferior da água

COPPE / UFRJ					programa de engenharia civil área: mecânica dos solos
					Data : 29/11/2005

ANEXO 4 - PERMEABILIDADE UTILIZANDO O PERMEÂMETRO DE GUELPH

Ensaio - Permeabilidade com Guelph

Data	Furo	Local	Profundidade furo (cm)	Altura de pressão (cm)	Intervalo de tempo (s)	Velocidade (cm/s)	h reservatorio	Vazão (cm^3/s)	Condutividade hidráulica (cm/s)
11/11/2005	1	cobertura	28	5	110	0,0491	5,40	2,636	0,00773
	2	resíduo industrial	60	5	220	0,0191	4,20	1,025	0,00301
				5	220	0,0273	6,00	1,465	0,00429
				5	370	0,0081	3,00	0,435	0,00128
				5	440	0,0000	0,00	0,000	0,00000
	2	resíduo industrial	60	10	2850	0,0118	33,60	0,633	0,00112
				10	180	0,0147	2,65	0,791	0,00139
				10	90	0,0156	1,40	0,835	0,00147
				10	180	0,0000	0,00	0,000	0,00000
29/11/2005	3	resíduo urbano	65	5	150	0,4933	74,00	26,492	0,07769
	4	resíduo urbano	65	5	190	0,3789	72,00	20,349	0,05967
	5	cobertura	35	5	180	0,0061	1,10	0,328	0,00096
					300	0,0000	0,00	0,000	0,00000
					600	0,0035	2,10	0,188	0,00280
					900	0,0001	0,10	0,006	0,00009
					1200	0,0001	0,10	0,004	0,00007
	5	cobertura	35	10	300	0,0110	3,30	0,591	0,00113
					600	0,0030	1,8	0,161	0,00400
					900	0,0002	0,2	0,012	0,00030
					1200	0,0001	0,1	0,004	0,00011

$$K_{sat} = \frac{C \cdot Q}{2 \cdot \pi \cdot H^2 + C \cdot \pi \cdot a^2 + \left(\frac{2 \cdot \pi}{\alpha} \right)}$$

Análise proposta por Elrick et al. (1989)

ANEXO 5– APLICAÇÃO DOS MODELOS DA USEPA, BM E IPCC

Cálculo da Emissão de Metano para Aterros sem Controle (RSU)- USEPA

Ano	R (RSU)	L_0	k	t	c	QCH_4 (m³/ano)	QCH_4 (t/ano)
2003	269.466	100	0,04	1	0	1.056.591	692
2004	274.694	100	0,04	2	0	2.111.945	1.383
2005	280.023	100	0,04	3	0	3.166.484	2.074
2006	285.455	100	0,04	4	0	4.220.632	2.765
2007	290.993	100	0,04	5	0	5.274.808	3.455
2008	290.993	100	0,04	6	1	5.067.980	3.320
2009	290.993	100	0,04	7	2	4.869.262	3.189
2010	290.993	100	0,04	8	3	4.678.335	3.064
2011	290.993	100	0,04	9	4	4.494.895	2.944
2012	290.993	100	0,04	10	5	4.318.648	2.829
2013	290.993	100	0,04	11	6	4.149.311	2.718
2014	290.993	100	0,04	12	7	3.986.614	2.611
2015	290.993	100	0,04	13	8	3.830.297	2.509
2016	290.993	100	0,04	14	9	3.680.109	2.410
2017	290.993	100	0,04	15	10	3.535.810	2.316
2018	290.993	100	0,04	16	11	3.397.169	2.225
2019	290.993	100	0,04	17	12	3.263.964	2.138
2020	290.993	100	0,04	18	13	3.135.982	2.054
2021	290.993	100	0,04	19	14	3.013.018	1.974
2022	290.993	100	0,04	20	15	2.894.876	1.896
2023	290.993	100	0,04	21	16	2.781.366	1.822
2024	290.993	100	0,04	22	17	2.672.307	1.750
2025	290.993	100	0,04	23	18	2.567.525	1.682
2026	290.993	100	0,04	24	19	2.466.851	1.616
2027	290.993	100	0,04	25	20	2.370.124	1.552
2028	290.993	100	0,04	26	21	2.277.190	1.492
2029	290.993	100	0,04	27	22	2.187.900	1.433
2030	290.993	100	0,04	28	23	2.102.112	1.377
2031	290.993	100	0,04	29	24	2.019.687	1.323
2032	290.993	100	0,04	30	25	1.940.493	1.271
2033	290.993	100	0,04	31	26	1.864.406	1.221
2034	290.993	100	0,04	32	27	1.791.301	1.173
2035	290.993	100	0,04	33	28	1.721.063	1.127
2036	290.993	100	0,04	34	29	1.653.579	1.083
2037	290.993	100	0,04	35	30	1.588.742	1.041
2038	290.993	100	0,04	36	31	1.526.446	1.000
2039	290.993	100	0,04	37	32	1.466.593	961
2040	290.993	100	0,04	38	33	1.409.087	923
2041	290.993	100	0,04	39	34	1.353.836	887
2042	290.993	100	0,04	40	35	1.300.752	852
2043	290.993	100	0,04	41	36	1.249.748	819
2044	290.993	100	0,04	42	37	1.200.745	786
2045	290.993	100	0,04	43	38	1.153.663	756
2046	290.993	100	0,04	44	39	1.108.427	726
2047	290.993	100	0,04	45	40	1.064.965	698
2048	290.993	100	0,04	46	41	1.023.208	670
2049	290.993	100	0,04	47	42	983.087	644
2050	290.993	100	0,04	48	43	944.540	619

Cálculo da Emissão de Metano para Aterros com Controle (RSU) -USEPA

Ano	Q CH_4	ncol	ncont	CM CH4 (t/ano)	CM CH4 (m³/ano)
2003	692	0,75	0,98	183	279.996,69
2004	1.383	0,75	0,98	367	559.665,44
2005	2.074	0,75	0,98	550	839.118,37
2006	2.765	0,75	0,98	733	1.118.467,35
2007	3.455	0,75	0,98	916	1.397.824,01
2008	3.320	0,75	0,98	880	1.343.014,70
2009	3.189	0,75	0,98	845	1.290.354,34
2010	3.064	0,75	0,98	812	1.239.758,83
2011	2.944	0,75	0,98	780	1.191.147,19
2012	2.829	0,75	0,98	750	1.144.441,64
2013	2.718	0,75	0,98	720	1.099.567,44
2014	2.611	0,75	0,98	692	1.056.452,78
2015	2.509	0,75	0,98	665	1.015.028,68
2016	2.410	0,75	0,98	639	975.228,83
2017	2.316	0,75	0,98	614	936.989,56
2018	2.225	0,75	0,98	590	900.249,68
2019	2.138	0,75	0,98	567	864.950,38
2020	2.054	0,75	0,98	544	831.035,19
2021	1.974	0,75	0,98	523	798.449,84
2022	1.896	0,75	0,98	502	767.142,17
2023	1.822	0,75	0,98	483	737.062,10
2024	1.750	0,75	0,98	464	708.161,48
2025	1.682	0,75	0,98	446	680.394,07
2026	1.616	0,75	0,98	428	653.715,44
2027	1.552	0,75	0,98	411	628.082,89
2028	1.492	0,75	0,98	395	603.455,41
2029	1.433	0,75	0,98	380	579.793,58
2030	1.377	0,75	0,98	365	557.059,55
2031	1.323	0,75	0,98	351	535.216,93
2032	1.271	0,75	0,98	337	514.230,78
2033	1.221	0,75	0,98	324	494.067,50
2034	1.173	0,75	0,98	311	474.694,83
2035	1.127	0,75	0,98	299	456.081,78
2036	1.083	0,75	0,98	287	438.198,56
2037	1.041	0,75	0,98	276	421.016,55
2038	1.000	0,75	0,98	265	404.508,25
2039	961	0,75	0,98	255	388.647,26
2040	923	0,75	0,98	245	373.408,18
2041	887	0,75	0,98	235	358.766,64
2042	852	0,75	0,98	226	344.699,20
2043	819	0,75	0,98	217	331.183,35
2044	786	0,75	0,98	208	318.197,46
2045	756	0,75	0,98	200	305.720,76
2046	726	0,75	0,98	192	293.733,28
2047	698	0,75	0,98	185	282.215,83
2048	670	0,75	0,98	178	271.149,99
2049	644	0,75	0,98	171	260.518,05
2050	619	0,75	0,98	164	250.302,99

Cálculo da Emissão de Metano para Aterros sem Controle - USEPA

Ano	R (RSU + RC II)	L_0	k	t	c	QCH_4 (m³/ano)	QCH_4 (t/ano)
2003	291.519	100	0,04	1	0	1.143.062	749
2004	484.694	100	0,04	2	0	3.726.502	2.441
2005	496.023	100	0,04	3	0	5.609.003	3.674
2006	501.455	100	0,04	4	0	7.414.326	4.856
2007	506.993	100	0,04	5	0	9.190.223	6.020
2008	506.993	100	0,04	6	1	8.829.870	5.784
2009	506.993	100	0,04	7	2	8.483.645	5.557
2010	506.993	100	0,04	8	3	8.150.997	5.339
2011	506.993	100	0,04	9	4	7.831.392	5.130
2012	506.993	100	0,04	10	5	7.524.318	4.928
2013	506.993	100	0,04	11	6	7.229.286	4.735
2014	506.993	100	0,04	12	7	6.945.821	4.550
2015	506.993	100	0,04	13	8	6.673.472	4.371
2016	506.993	100	0,04	14	9	6.411.801	4.200
2017	506.993	100	0,04	15	10	6.160.391	4.035
2018	506.993	100	0,04	16	11	5.918.839	3.877
2019	506.993	100	0,04	17	12	5.686.758	3.725
2020	506.993	100	0,04	18	13	5.463.777	3.579
2021	506.993	100	0,04	19	14	5.249.539	3.438
2022	506.993	100	0,04	20	15	5.043.702	3.304
2023	506.993	100	0,04	21	16	4.845.935	3.174
2024	506.993	100	0,04	22	17	4.655.923	3.050
2025	506.993	100	0,04	23	18	4.473.362	2.930
2026	506.993	100	0,04	24	19	4.297.959	2.815
2027	506.993	100	0,04	25	20	4.129.434	2.705
2028	506.993	100	0,04	26	21	3.967.516	2.599
2029	506.993	100	0,04	27	22	3.811.948	2.497
2030	506.993	100	0,04	28	23	3.662.479	2.399
2031	506.993	100	0,04	29	24	3.518.871	2.305
2032	506.993	100	0,04	30	25	3.380.894	2.214
2033	506.993	100	0,04	31	26	3.248.327	2.128
2034	506.993	100	0,04	32	27	3.120.959	2.044
2035	506.993	100	0,04	33	28	2.998.584	1.964
2036	506.993	100	0,04	34	29	2.881.008	1.887
2037	506.993	100	0,04	35	30	2.768.042	1.813
2038	506.993	100	0,04	36	31	2.659.506	1.742
2039	506.993	100	0,04	37	32	2.555.225	1.674
2040	506.993	100	0,04	38	33	2.455.033	1.608
2041	506.993	100	0,04	39	34	2.358.770	1.545
2042	506.993	100	0,04	40	35	2.266.281	1.484
2043	506.993	100	0,04	41	36	2.177.419	1.426
2044	506.993	100	0,04	42	37	2.092.041	1.370
2045	506.993	100	0,04	43	38	2.010.011	1.317
2046	506.993	100	0,04	44	39	1.931.197	1.265
2047	506.993	100	0,04	45	40	1.855.474	1.215
2048	506.993	100	0,04	46	41	1.782.720	1.168
2049	506.993	100	0,04	47	42	1.712.818	1.122
2050	506.993	100	0,04	48	43	1.645.658	1.078

Cálculo da Emissão Total de Metano com Sistema de Controle - EPA

Ano	Q CH_4	ncol	ncont	CM CH4 (t/ano)	CM CH4 (m^3/ano)
2003	749	0,75	0,98	198	302.911,52
2004	2.441	0,75	0,98	647	987.522,98
2005	3.674	0,75	0,98	974	1.486.385,79
2006	4.856	0,75	0,98	1.287	1.964.796,30
2007	6.020	0,75	0,98	1.595	2.435.409,18
2008	5.784	0,75	0,98	1.533	2.339.915,42
2009	5.557	0,75	0,98	1.473	2.248.166,03
2010	5.339	0,75	0,98	1.415	2.160.014,18
2011	5.130	0,75	0,98	1.359	2.075.318,81
2012	4.928	0,75	0,98	1.306	1.993.944,39
2013	4.735	0,75	0,98	1.255	1.915.760,72
2014	4.550	0,75	0,98	1.206	1.840.642,66
2015	4.371	0,75	0,98	1.158	1.768.470,03
2016	4.200	0,75	0,98	1.113	1.699.127,33
2017	4.035	0,75	0,98	1.069	1.632.503,60
2018	3.877	0,75	0,98	1.027	1.568.492,21
2019	3.725	0,75	0,98	987	1.506.990,75
2020	3.579	0,75	0,98	948	1.447.900,80
2021	3.438	0,75	0,98	911	1.391.127,80
2022	3.304	0,75	0,98	875	1.336.580,90
2023	3.174	0,75	0,98	841	1.284.172,81
2024	3.050	0,75	0,98	808	1.233.819,68
2025	2.930	0,75	0,98	776	1.185.440,91
2026	2.815	0,75	0,98	746	1.138.959,11
2027	2.705	0,75	0,98	717	1.094.299,89
2028	2.599	0,75	0,98	689	1.051.391,77
2029	2.497	0,75	0,98	662	1.010.166,11
2030	2.399	0,75	0,98	636	970.556,93
2031	2.305	0,75	0,98	611	932.500,85
2032	2.214	0,75	0,98	587	895.936,97
2033	2.128	0,75	0,98	564	860.806,78
2034	2.044	0,75	0,98	542	827.054,06
2035	1.964	0,75	0,98	520	794.624,81
2036	1.887	0,75	0,98	500	763.467,12
2037	1.813	0,75	0,98	480	733.531,15
2038	1.742	0,75	0,98	462	704.768,98
2039	1.674	0,75	0,98	444	677.134,59
2040	1.608	0,75	0,98	426	650.583,77
2041	1.545	0,75	0,98	409	625.074,01
2042	1.484	0,75	0,98	393	600.564,51
2043	1.426	0,75	0,98	378	577.016,04
2044	1.370	0,75	0,98	363	554.390,92
2045	1.317	0,75	0,98	349	532.652,94
2046	1.265	0,75	0,98	335	511.767,32
2047	1.215	0,75	0,98	322	491.700,63
2048	1.168	0,75	0,98	309	472.420,78
2049	1.122	0,75	0,98	297	453.896,89
2050	1.078	0,75	0,98	286	436.099,34

Gás Gerado (RSU) - Banco Mundial

Ano	k	L_0	m	t	QCH4 (m³/ano)	QCH4 (t/ano)
2003	0,06	170	269.466	0	2.748.553	1.800
2004	0,06	170	274.694	0	2.801.875	1.835
2005	0,06	170	280.023	0	2.856.232	1.871
2006	0,06	170	285.455	0	2.911.642	1.907
2007	0,06	170	290.993	0	2.968.128	1.944
2008	0,06	170	290.993	1	2.795.278	1.831
2009	0,06	170	290.993	2	2.632.494	1.724
2010	0,06	170	290.993	3	2.479.189	1.624
2011	0,06	170	290.993	4	2.334.813	1.529
2012	0,06	170	290.993	5	2.198.844	1.440
2013	0,06	170	290.993	6	2.070.793	1.356
2014	0,06	170	290.993	7	1.950.199	1.277
2015	0,06	170	290.993	8	1.836.629	1.203
2016	0,06	170	290.993	9	1.729.672	1.133
2017	0,06	170	290.993	10	1.628.944	1.067
2018	0,06	170	290.993	11	1.534.081	1.005
2019	0,06	170	290.993	12	1.444.743	946
2020	0,06	170	290.993	13	1.360.608	891
2021	0,06	170	290.993	14	1.281.372	839
2022	0,06	170	290.993	15	1.206.751	790
2023	0,06	170	290.993	16	1.136.475	744
2024	0,06	170	290.993	17	1.070.292	701
2025	0,06	170	290.993	18	1.007.963	660
2026	0,06	170	290.993	19	949.264	622
2027	0,06	170	290.993	20	893.983	586
2028	0,06	170	290.993	21	841.922	551
2029	0,06	170	290.993	22	792.892	519
2030	0,06	170	290.993	23	746.717	489
2031	0,06	170	290.993	24	703.232	461
2032	0,06	170	290.993	25	662.279	434
2033	0,06	170	290.993	26	623.711	409
2034	0,06	170	290.993	27	587.389	385
2035	0,06	170	290.993	28	553.182	362
2036	0,06	170	290.993	29	520.967	341
2037	0,06	170	290.993	30	490.628	321
2038	0,06	170	290.993	31	462.056	303
2039	0,06	170	290.993	32	435.148	285
2040	0,06	170	290.993	33	409.807	268
2041	0,06	170	290.993	34	385.942	253
2042	0,06	170	290.993	35	363.466	238
2043	0,06	170	290.993	36	342.300	224
2044	0,06	170	290.993	37	322.366	211
2045	0,06	170	290.993	38	303.593	199
2046	0,06	170	290.993	39	285.913	187
2047	0,06	170	290.993	40	269.263	176
2048	0,06	170	290.993	41	253.582	166
2049	0,06	170	290.993	42	238.814	156
2050	0,06	170	290.993	43	224.907	147

Gás Gerado (RSU + R Classe IIA) - Banco Mundial

Ano	k	L_0	m	t	QCH4 (m³/ano)	QCH4 (t/ano)
2003	0,06	170	291.519	0	2.973.494	1.948
2004	0,06	170	484.694	0	4.943.875	3.238
2005	0,06	170	496.023	0	5.059.432	3.314
2006	0,06	170	501.455	0	5.114.842	3.350
2007	0,06	170	506.993	0	5.171.328	3.387
2008	0,06	170	506.993	1	4.870.174	3.190
2009	0,06	170	506.993	2	4.586.557	3.004
2010	0,06	170	506.993	3	4.319.456	2.829
2011	0,06	170	506.993	4	4.067.911	2.664
2012	0,06	170	506.993	5	3.831.014	2.509
2013	0,06	170	506.993	6	3.607.913	2.363
2014	0,06	170	506.993	7	3.397.805	2.226
2015	0,06	170	506.993	8	3.199.932	2.096
2016	0,06	170	506.993	9	3.013.583	1.974
2017	0,06	170	506.993	10	2.838.085	1.859
2018	0,06	170	506.993	11	2.672.808	1.751
2019	0,06	170	506.993	12	2.517.156	1.649
2020	0,06	170	506.993	13	2.370.568	1.553
2021	0,06	170	506.993	14	2.232.517	1.462
2022	0,06	170	506.993	15	2.102.505	1.377
2023	0,06	170	506.993	16	1.980.065	1.297
2024	0,06	170	506.993	17	1.864.755	1.221
2025	0,06	170	506.993	18	1.756.160	1.150
2026	0,06	170	506.993	19	1.653.889	1.083
2027	0,06	170	506.993	20	1.557.574	1.020
2028	0,06	170	506.993	21	1.466.868	961
2029	0,06	170	506.993	22	1.381.444	905
2030	0,06	170	506.993	23	1.300.995	852
2031	0,06	170	506.993	24	1.225.231	803
2032	0,06	170	506.993	25	1.153.879	756
2033	0,06	170	506.993	26	1.086.683	712
2034	0,06	170	506.993	27	1.023.399	670
2035	0,06	170	506.993	28	963.801	631
2036	0,06	170	506.993	29	907.674	595
2037	0,06	170	506.993	30	854.815	560
2038	0,06	170	506.993	31	805.034	527
2039	0,06	170	506.993	32	758.153	497
2040	0,06	170	506.993	33	714.001	468
2041	0,06	170	506.993	34	672.421	440
2042	0,06	170	506.993	35	633.262	415
2043	0,06	170	506.993	36	596.384	391
2044	0,06	170	506.993	37	561.653	368
2045	0,06	170	506.993	38	528.945	346
2046	0,06	170	506.993	39	498.142	326
2047	0,06	170	506.993	40	469.132	307
2048	0,06	170	506.993	41	441.812	289
2049	0,06	170	506.993	42	416.083	273
2050	0,06	170	506.993	43	391.852	257

Calculo das emissões de CH4 utilizando a Metodologia IPCC - RSU com Variação de parâmetros

Cálculo com K sugerido e COD sugerido

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,819	773	1.181.735
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,861	829	1.266.425
2005	280.023	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,905	888	1.357.184
2006	285.455	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,951	952	1.454.448
2007	290.993	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	1,000	1.020	1.558.682
										4.462	6.818.475

Cálculo com K estimado e COD calculado

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,670	679	1.038.323
2004	274.694	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,741	765	1.169.786
2005	280.023	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	862	1.317.894
2006	285.455	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	972	1.484.754
2007	290.993	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	1.095	1.672.741
										4.373	6.683.497

Cálculo com K estimado e COD sugerido

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,1	0,952	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,670	1.235	1.887.859
2004	274.694	0,1	0,952	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,741	1.392	2.126.883
2005	280.023	0,1	0,952	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,819	1.568	2.396.171
2006	285.455	0,1	0,952	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,905	1.766	2.699.553
2007	290.993	0,1	0,952	1	0,14	0,77	0,5	0,072	1,000	1.990	3.041.346
										7.952	12.151.812

Cálculo com K sugerido e COD calculado

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	425	649.954
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	456	696.534
2005	280.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	488	746.451
2006	285.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	523	799.946
2007	290.993	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	561	857.275
										2.454	3.750.161

Cálculo com K e L_0 propostos pela EPA

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,04	0,980					0,065	0,852	585	894.382
2004	274.694	0,04	0,980					0,065	0,887	621	948.941
2005	280.023	0,04	0,980					0,065	0,923	659	1.006.829
2006	285.455	0,04	0,980					0,065	0,961	699	1.068.248
2007	290.993	0,04	0,980					0,065	1,000	742	1.133.414
										3.306	5.051.815

Cálculo com K e L_0 propostos pelo Banco Mundial

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,06	0,971					0,111	0,787	1.370	2.093.985
2004	274.694	0,06	0,971					0,111	0,835	1.483	2.266.605
2005	280.023	0,06	0,971					0,111	0,887	1.605	2.453.455
2006	285.455	0,06	0,971					0,111	0,942	1.738	2.655.709
2007	290.993	0,06	0,971					0,111	1,000	1.881	2.874.635
										8.078	12.344.389

Calculo das emissões de CH4 utilizando a Metodologia IPCC - RSU

Criterios adotados: K sugerido e COD calculado

Simulação para RSU-2003

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.003	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	519	793.856

Simulação para RSU-2004

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.004	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	494	755.139
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	530	809.257
										1.024	1.564.396

Simulação para RSU - 2005

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.005	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	470	718.311
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	504	769.789
2005	280.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	540	824.956
										1.514	2.313.056

Simulação para RSU - 2006

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.006	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	447	683.278
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	479	732.246
2005	280.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	513	784.723
2006	285.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	550	840.961
										1.990	3.041.207

Simulação para RSU - 2007

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	269.466	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	425	649.954
2004	274.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	456	696.534
2005	280.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	488	746.451
2006	285.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	523	799.946
2007	290.993	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	561	857.275
										2.454	3.750.161

Ano	CH4 gerado (m³/ano)
2002	0
2003	793.856
2004	1.564.396
2005	2.313.056
2006	3.041.207
2007	3.750.161

Calculo das emissões de CH4 utilizando a Metodologia IPCC - RSU +RC II com Variação de parâmetros

Cálculo com K sugerido e COD sugerido

Simulação RSU + Resíduo Classe II

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m^3/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,819	837	1.278.448
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,861	1.462	2.234.592
2005	496.023	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,905	1.573	2.404.070
2006	501.455	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	0,951	1.672	2.555.009
2007	506.993	0,05	0,975	1	0,14	0,77	0,5	0,072	1,000	1.777	2.715.670
										7.321	11.187.789

Cálculo com K estimado e COD calculado

Simulação RSU + Resíduo Classe II

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m^3/ano)
2003	291.519	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,670	735	1.123.298
2004	484.694	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,741	1.351	2.064.073
2005	496.023	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	1.528	2.334.472
2006	501.455	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	1.707	2.608.247
2007	506.993	0,1	0,952	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	1.907	2.914.392
										7.227	11.044.484

Cálculo com K sugerido e COD calculado

Simulação RSU + Resíduo Classe II

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m^3/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	460	703.146
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	804	1.229.026
2005	496.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	865	1.322.239
2006	501.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	920	1.405.255
2007	506.993	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	977	1.493.619
										4.026	6.153.284

Cálculo com K e L_0 propostos pela EPA

Simulação RSU + Resíduo Classe II

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m^3/ano)
2003	291.519	0,04	0,980					0,065	0,852	633	967.578
2004	484.694	0,04	0,980					0,065	0,887	1.096	1.674.396
2005	496.023	0,04	0,980					0,065	0,923	1.167	1.783.463
2006	501.455	0,04	0,980					0,065	0,961	1.228	1.876.577
2007	506.993	0,04	0,980					0,065	1,000	1.292	1.974.731
										5.416	8.276.745

Cálculo com K e L_0 propostos pelo Banco Mundial

Simulação RSU + Resíduo Classe II

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m^3/ano)
2003	291.519	0,06	0,971					0,111	0,787	1.482	2.265.356
2004	484.694	0,06	0,971					0,111	0,835	2.617	3.999.397
2005	496.023	0,06	0,971					0,111	0,887	2.844	4.345.967
2006	501.455	0,06	0,971					0,111	0,942	3.053	4.665.247
2007	506.993	0,06	0,971					0,111	1,000	3.277	5.008.436
										13.273	20.284.403

Calculo das emissões de CH4 utilizando a Metodologia IPCC - RSU + RC II

Criterios adotados: K sugerido e COD calculado

Simulação para RSU + RC II - 2003

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.003	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	562	858.825

Simulação para RSU + RC II - 2004

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.004	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	535	816.940
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	934	1.427.924
										1.469	2.244.863

Simulação para RSU + RC II - 2005

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.005	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	508	777.097
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	889	1.358.283
2005	496.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	956	1.461.300
										2.353	3.596.680

Simulação para RSU + RC II - 2006

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.006	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	484	739.197
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	845	1.292.039
2005	496.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	910	1.390.031
2006	501.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	967	1.477.304
										3.205	4.898.572

Simulação para RSU + RC II - 2007

Ano	$RSU_{depositado}$	k	A	FCM	COD	COD_F	F	L_0	$e^{(-k(t-x))}$ t=2.007	CH4 gerado (t/ano)	CH4 gerado (m³/ano)
2003	291.519	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,819	460	703.146
2004	484.694	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,861	804	1.229.026
2005	496.023	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,905	865	1.322.239
2006	501.455	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	0,951	920	1.405.255
2007	506.993	0,05	0,975	1	0,077	0,77	0,5	0,040	1,000	977	1.493.619
										4.026	6.153.284

Ano	CH4 gerado (m³/ano)
2003	858.825
2004	2.244.863
2005	3.596.680
2006	4.898.572
2007	6.153.284

TEOR DE CARBONO ORGÂNICO DEGRADÁVEL PARA OS COMPONENTES DO LIXO

COMPONENTE	PORCENTAGEM DE COD EM MASSA
A. PAPEL, PAPELÃO E TECIDOS	40
B. RESÍDUOS DE PARQUES E JARDINS	17
C. RESTOS DE ALIMENTOS	15
D. MADEIRA	30

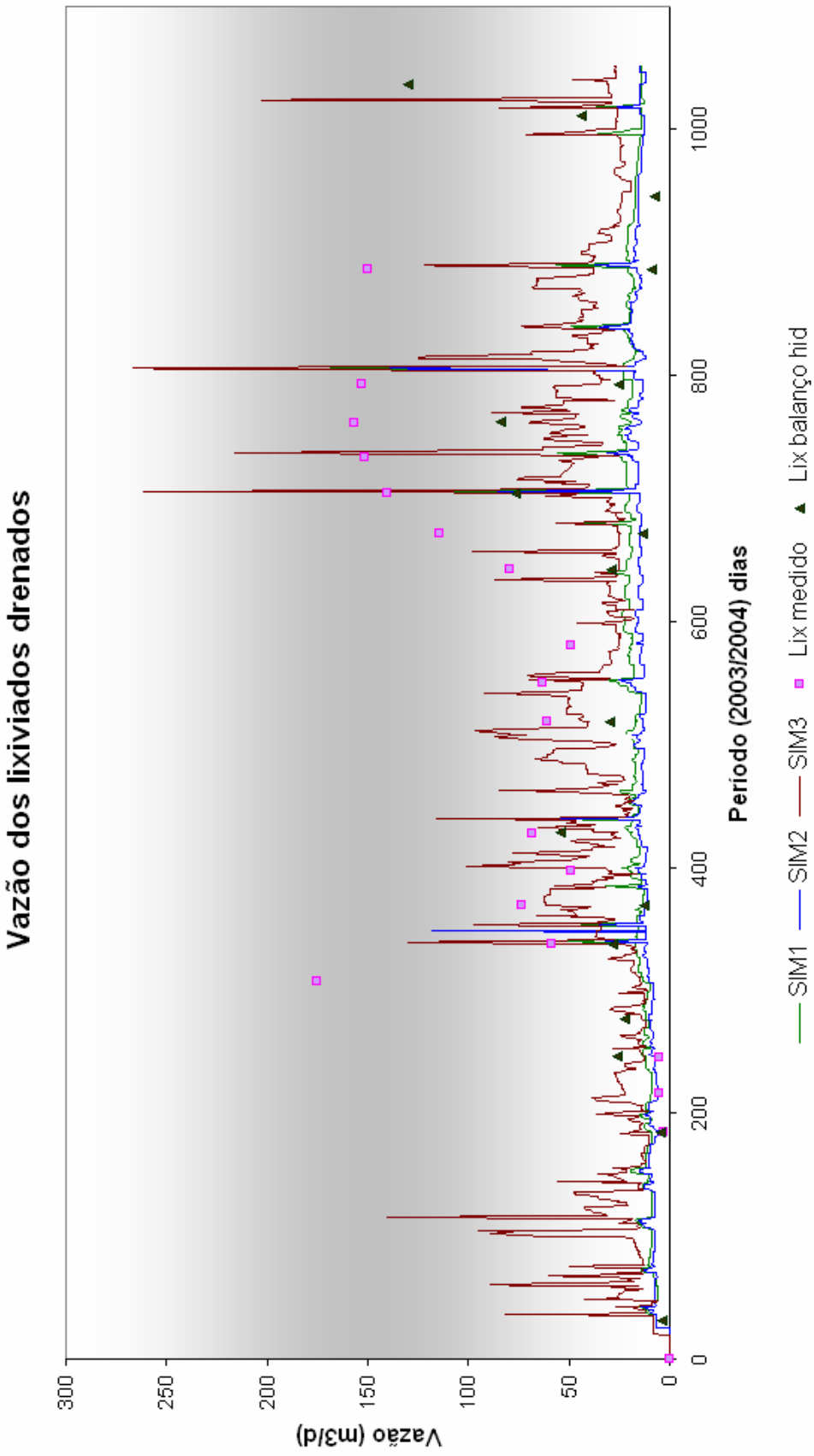
Ksugerido=	0,05
k estimado	0,1
COD sugerido=	0,14
COD=0,4A+0,17B+0,15C+0,30D=	0,07724

ANEXO 6 - RESÍDUOS RECEBIDOS NO ATERRO DE NOVA IGUAÇU

RASTREABILIDADE DE RESÍDUOS (Peso específico considerado = 0,915 t/m³)

	nº cel R Classe IIA (A= 15x15)	nº cel RSU (A= 15x15)	Total	Área (m²)	(Vol m³)
2003					
FEVEREIRO	0	13	13	2925	14625
MARÇO	0	26	26	5850	29250
ABRIL	0	26	26	5850	29250
MAIO	0	26	26	5850	29250
JUNHO	0	26	26	5850	29250
JULHO	0	26	26	5850	29250
AGOSTO	0	26	26	5850	29250
SETEMBRO	0	26	26	5850	29250
OUTUBRO	5	26	31	6975	34875
NOVEMBRO	11	26	37	8325	41625
DEZEMBRO	6	26	32	7200	36000
MEDIA	2	25	27	6034	30170
2004					
JANEIRO	1	26	27	6075	30375
FEVEREIRO	2	26	28	6300	31500
MARÇO	2	26	28	6300	31500
ABRIL	4	26	30	6750	33750
MAIO	8	26	34	7650	38250
JUNHO	16	26	42	9450	47250
JULHO	18	26	44	9900	49500
AGOSTO	28	26	54	12150	60750
SETEMBRO	19	26	45	10125	50625
OUTUBRO	33	26	59	13275	66375
NOVEMBRO	43	26	69	15525	77625
DEZEMBRO	46	26	72	16200	81000
MEDIA	18	26	44	9975	49875
2005					
JANEIRO	53	26	79	17775	88875
FEVEREIRO	49	26	75	16875	84375
MARÇO	66	26	92	20700	103500
ABRIL	48	26	74	16650	83250
MAIO	39	26	65	14625	73125
JUNHO	50	26	76	17100	85500
JULHO	47	26	73	16425	82125
AGOSTO	27	26	53	11925	59625
SETEMBRO	26	26	52	11700	58500
OUTUBRO	44	26	70	15750	78750
NOVEMBRO	29	26	55	12375	61875
DEZEMBRO	20	26	46	10350	51750
MEDIA	42	26	68	15188	75938
Total	**740**	**897**	**1637**		**1.841.625**

RESUMO DAS MÉDIAS

Ano	Res. Classe IIA / mês	RSU / mês	Total Resíduos/ mês
2003	7	25	32
2004	18	26	44
2005	42	26	68

ANEXO 7 – CALIBRAÇÃO DO MODELO HIDROLÓGICO