



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

**ESTUDO BIODEGRADATIVO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB EM
ESCALA EXPERIMENTAL**

Roberta Costa Meira

Campina Grande – PB, 03 de abril de 2009

Roberta Costa Meira

**ESTUDO BIODEGRADATIVO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE - PB EM
ESCALA EXPERIMENTAL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação da Universidade Federal de Campina Grande, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Engenharia de Recursos Hídricos e Sanitária

Orientadora: Veruschka Escarião Dessoles Monteiro

Co-orientador: William de Paiva

Campina Grande – PB, 03 de abril de 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

M514e

2009 Meira, Roberta Costa.

Estudo biodegradativo dos resíduos sólidos urbanos da cidade de Campina Grande-PB em escala experimental / Roberta Costa Meira. — Campina Grande, 2009.

113 f. : il. col.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Referências.

Orientadores: Prof^a. Dr^a. Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, Prof. Dr. William de Paiva.

1. Resíduos Sólidos Urbanos. 2. Lisímetros. 3. Biodegradação. I. Título.

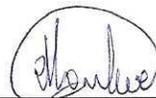
CDU – 628.4(043)

**ESTUDO BIODEGRADATIVO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS
URBANOS DA CIDADE DE CAMPINA GRANDE EM ESCALA
EXPERIMENTAL**

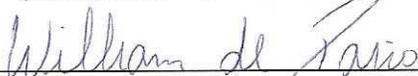
ROBERTA COSTA MEIRA

DISSERTAÇÃO APRESENTADA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE, COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE MESTRE
EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:



Veruschka Escarião Dessoles Monteiro (DSc)
(Orientadora – Universidade Federal de Campina Grande)



William de Paiva (DSc)
(Co-orientador – Universidade Estadual da Paraíba)



Janete Magali de Araújo (DSc)
(Examinador externo – Universidade Federal de Pernambuco)



Annemarie König (DSc)
(Examinador interno – Universidade Federal de Campina Grande)

Campina Grande, PB – Brasil
2009

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a minha família e a Nino, que participou e me apoiou durante esta caminhada, sendo o meu companheiro em todos os momentos. Por tudo e para sempre, obrigada!!!

AGRADECIMENTOS

A Deus e a Virgem Maria, por me fazerem sentir a sua presença em todos os momentos da minha caminhada; nos momentos felizes em que me conduziam pela mão e nos momentos de dificuldades em que me carregavam em seus braços.

A minha família pelo carinho, apoio e orações para final deste trabalho.

Ao meu namorado, Nino, que não tenho palavras para agradecer o quão foi sua ajuda em todos os momentos dessa etapa da minha vida. Obrigada!!

A minha orientadora Veruschka Escarião Dessoles Monteiro, pela amizade, apoio incondicional nos momentos difíceis da minha vida. Pela forma tranqüila que conduziu esta pesquisa, pelos ensinamentos e exemplo de profissionalismo e ética, pela confiança, pelo carinho e compreensão em todos os momentos desta pesquisa. Obrigada por esse momento se tornar realidade!

Ao co-orientador William de Paiva pela contribuição na elaboração e instalação da instrumentação do lisímetro, como também pela orientação nos conceitos e aplicações das análises estatísticas.

As professoras Janete Magali de Araújo e Annemarie König pela contribuição e apoio técnico;

A Coordenação do Mestrado, na pessoa do professor Kennedy Rodrigues;

Aos professores da Universidade Federal de Campina Grande Adriannus Van Handell, Berto Machado, Beatriz Ceballos, Mônica Coura, John Kennedy Rodrigues, Paula Francinetti e Rui de Oliveira, agradeço por todos os ensinamentos durante o curso de Pós-Graduação;

Ao professor Mozaniel que contribuiu consideravelmente na parte técnica da pesquisa.

A todos aos meus amigos que me acompanharam a cada dia. Vocês fazem parte disso e são muito especiais;

A turma do Mestrado, Carlos Henrique, Elivânia, Érica, Fábio, Heraldo. Vocês serão inesquecíveis;

A Márcio Camargo de Melo pela imensa colaboração neste trabalho, pela sua disposição e sugestões sempre valiosas.

Aos atuais e ex-integrantes do Grupo de Pesquisa em Resíduos Sólidos: Clebiana, Emanuely, Francisco, Franklin, Giovana, Gustavo, Hosana, Mariana, Roberta Fraga, Rosa, Deborah, João Neto e Kaliana. Agradeço por todas as contribuições no desenvolvimento deste trabalho, se não fosse por vocês muita coisa não teria sido realizada;

A equipe de microbiologia em especial, Flávia, Giovanna, Rafaela obrigada pelo apoio e pelo carinho de todas vocês.

Aos funcionários da EXTRABES, PROSAB e do programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, em especial a Cristina e Valmária;

A CAPES pelo apoio financeiro da bolsa de estudos;

Ao PROAP pelo auxílio financeiro para o desenvolvimento desta pesquisa;

A minha amiga Lilyanne, que só tenho a agradecer pela contribuição, pelo carinho e compreensão em todos os momentos da minha vida. Obrigada pela força, pelas palavras de conforto que me foram ditas nas horas certas.

A todos que contribuíram e fizeram parte desse sonho, para que ele se tornasse realidade.

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) têm causado problemas a sociedade e ao meio ambiente. Os RSU na maioria das cidades brasileiras são comumente depositados em lixões ou aterros tornando-se necessário o monitoramento desses locais, visando impedir a contaminação do ar, do solo e dos resíduos hídricos. Células experimentais (lisímetros) podem ser utilizadas para obter parâmetros e entender o comportamento de aterros de RSU através de seu monitoramento. A presente pesquisa foi realizada no campo experimental – EXTRABES (Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários) e teve como objetivo verificar e monitorar o processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, na cidade de Campina Grande-PB, através da compreensão dos processos físicos, químicos e microbiológicos que ocorrem em um lisímetro em escala experimental. O monitoramento do lisímetro envolveu medições “*in situ*” e coleta periódica de amostras de resíduos sólidos para análises laboratoriais de vários parâmetros, como: temperatura, teor de umidade, pH, metais, quantificação de microrganismos (grupo coliforme, aeróbios totais e fungos) e testes de fitotoxicidade, além de estudos estatísticos para verificar o comportamento dos parâmetros analisados. O comportamento geral da maioria dos parâmetros foi compatível com valores encontrados por diversos autores em pesquisas com aterros de RSU ou células experimentais. Devido à heterogeneidade dos resíduos e do processo de coleta das amostras sólidas, a grande maioria dos resultados apresentou oscilações em seus valores. Os resultados indicaram que as condições climáticas podem influenciar consideravelmente na quantificação de microrganismos e umidade. De acordo com o pH as amostras de resíduos na faixa superior do lisímetro, apresentaram uma fase inicial ácida bastante curta, apresentando-se já na fase metanogênica após os 50 dias de monitoramento. Diferentemente, na amostra inferior, onde as fases acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas foram bem observadas no lisímetro. O estudo estatístico demonstrou que os microrganismos aeróbios e os fungos apresentaram um desenvolvimento microbiano crescente na massa de lixo, onde a temperatura e a umidade favorecem a essa atividade

Palavras-chave: Resíduos sólidos urbanos, lisímetros, biodegradação.

ABSTRACT

Municipal solid waste (MSW) has caused problems for society and for the environment. In most Brazilian cities MSW are usually deposited in landfills or open land areas, which makes the monitoring of such sites necessary to prevent the contamination of the air, soil and water. Experimental cells (lysimeters) can be used for parameters and for understand the behavior of MSW landfills through its monitoring. This study was conducted in a Experimental Station – ESTRABES (Estação Experimental de Tratamento Biológico de Esgotos Sanitários) and its purpose is to verify and monitor the process of biodegradation of municipal solid waste in the city of Campina Grande-PB, through the understanding of physical, chemical and microbiological parameters in a lysimeter as a smaller scale experiment. The monitoring of the lysimeter measurements involved "in situ" experiments and periodic collection of solid waste samples for laboratory testing of various parameters, such as temperature, moisture content, pH, metals, quantification of microorganisms (coliform group, total aerobic and fungi) and tests of phytotoxicity, and statistical studies to verify the behavior of the analyzed characteristics. The general behavior of most parameters was consistent with values found by various authors in search of MSW landfills or experimental cells. Due to the heterogeneity of the waste and the process of collection of solid samples, most of the results showed variations in their values. The results indicated that weather conditions can significantly influence the quantification of microorganisms and moisture. According to the pH results from the superior samples of the lysimeter, it is shown that there is a very short initial acid phase, presenting a methanogenic stage after 50 days of monitoring. Unlike the lower sample where the acidogênicas, acetogênicas and methanogenic phases were well observed in the lysimeter. Statistical analysis showed that aerobic microorganisms and fungi showed a growing microbial development in the mass of garbage, where temperature and humidity encourage this activity.

Keywords: Municipal solid waste, lysimeters, biodegradation.

LISTA DE FIGURAS

1. Estrutura de um aterro sanitário de RSU e o fluxo do percolado	23
2. Representação esquemática do ecossistema aterro sanitário	24
3. Decomposição e Fase aeróbia em Aterros Sanitários	28
4. Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia nos RSU	30
5. Seqüência das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia	32
6. Curva do crescimento microbiano mostrando as quatro fases	35
7. Temperaturas dos Microrganismos	38
8. Célula experimental (lisímetro/biorreator)	50
9. Fluxograma do Procedimento Experimental Utilizado	51
10. Desenho esquemático da célula experimental (Lisímetro)	52
11. Impermeabilização, drenagem e camada de cobertura do Lisímetro	53
12. Termopar com conector tipo K e termômetro	54
13. Instalação do piezômetro no Lisímetro	55
14. Placas para medição de recalque	56
15. Sistema de drenagem de gás	57
16. Mapa dos bairros de Campina Grande	58
17. Descarregamento (1), homogeneização do material (2) e divisão das pilhas (3)	59
18. Etapas do preenchimento do Lisímetro	60
19. Obtenção das amostras do Lisímetro	61
20. Esquema da quantificação de coliformes por tubos múltiplos	64

21. Tubos de ensaio presuntivo de Coliformes Totais	64
22. Desenho esquemático do procedimento do ensaio de Aeróbios Totais	66
23. Placas de Ensaio de Aeróbios Totais	66
24. Colônia de Fungos	67
25. Ensaio de Fitotoxicidade	69
26. Precipitação (a) e Evaporação (b) da cidade de Campina Grande	72
27. Variação da temperatura dos resíduos aterrados no interior do lisímetro	74
28. Variação da temperatura ambiente media no decorrer do tempo	75
29. Classificação do microrganismo em função da temperatura	76
30. Variação do teor de umidade no decorrer do tempo	77
31. Variação do pH no decorrer do tempo	79
32. Evolução do teor de sólidos voláteis dos resíduos sólidos aterrados	82
33. Evolução da concentração de DQO dos resíduos sólidos aterrados	83
34. Evolução da concentração de DBO dos resíduos sólidos aterrados	85
35. Evolução da relação DBO/DQO dos resíduos sólidos aterrados	86
36. Teor de cobre (a), ferro (b), manganês (c) e zinco (d) no decorrer do tempo	87
37. Concentração de coliformes totais no decorrer do tempo	89
38. Concentração de coliformes termotolerantes no decorrer do tempo	90
39. Concentração de microrganismos aeróbios no decorrer do tempo	92
40. Concentração de fungos no decorrer do tempo	93
41. GRS para semente de tomate	94
42. CRR para semente de tomate	94

43. GRS para semente de repolho	95
44. CRR para semente de repolho	96
45. Histograma dos dados de aeróbios Totais	98
46. Histograma dos dados de Fungos	98
47. Análise dos componentes principais com dados da amostra superior	101
48. Análise dos componentes principais com dados da amostra inferior	101

LISTA DE TABELAS

1. Concentrações inibitórias dos metais pesados na digestão anaeróbia	42
2. Resumo da análise de variância ANOVA (fator único) para GRS superior	97
3. Resumo da análise de variância ANOVA (fator único) para GRS inferior	97
4. Matriz de correlação dos parâmetros analisados para a amostra superior	99
5. Matriz de correlação dos parâmetros analisados para a amostra inferior	99

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
1.1 Considerações Gerais	14
1.2 Objetivos da pesquisa	16
2. REVISÃO DA LITERATURA	17
2.1 Resíduos sólidos	17
2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos	18
2.2 Resíduos sólidos urbanos (RSU)	19
2.3 Disposição final de RSU	21
2.4 Aterro Sanitário de RSU	23
2.5 Impactos Ambientais, Econômicos e Sociais associados aos RSU	25
2.6 Lisímetros e Biorreatores	26
2.7 Biodegradação em RSU	27
2.7.1 Curva do crescimento bacteriano em RSU	34
2.8 Fatores Intervenientes no Processo Biodegradativo	37
2.8.1 Temperatura	37
2.8.2 Teor de Umidade	39
2.8.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)	40
2.8.4 Demanda bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO)	40
2.8.5 Teor de Sólidos Voláteis	41
2.8.6 Teor de Metais Pesados	42
2.8.7 Microbiologia	43
2.8.7.1 Microrganismos Indicadores de Poluição	43
2.8.7.1.1 Grupo Coliforme	44
2.8.7.2 Fungos	45
2.8.8 Fitotoxicidade	46

2.9 Estatística	47
2.9.1 Estatística descritiva	47
2.9.2 Análise de componentes principais	48
2.9.3 Análise de variância (ANOVA)	49
3. METODOLOGIA	50
3.1 Introdução	50
3.2 Projeto e Construção do Lisímetro	51
3.3 Instrumentações do Lisímetro	53
3.3.1 Termopares	54
3.3.2 Medidor de Nível de Água	54
3.3.3 Placas de Recalques	55
3.3.4 Drenagem de Gases	56
3.4 Caracterizações dos Resíduos e Preenchimento do Lisímetro	57
3.4.1 Preparação da Amostra	57
3.4.2 Caracterização da amostra	58
3.5 Preenchimentos do Lisímetro	60
3.6 Coleta e Preparação das amostras de sólidos (lixo)	61
3.7 Análises de Parâmetros Microbiológicos	62
3.7.1 Diluições da Amostra	62
3.7.2 Preparo dos Meios de Cultura	62
3.7.3 Quantificação de Coliformes	63
3.7.3.1 Técnica dos Tubos Múltiplos	63
3.7.3.1.1 Ensaio Presuntivo para Coliformes Totais	63
3.7.3.1.2 Ensaio Confirmativo para Coliformes Totais	65

3.7.3.1.3 Ensaio Confirmativo para Coliformes Termotolerantes	65
3.7.4 Aeróbios Totais	65
3.7.5 Fungos	67
3.8 Testes de fitotoxicidade	68
3.9 Análise dos Parâmetros Físicos, Químicos e Físico-Químicos	69
3.10 Análise Estatística	70
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	71
4.1 Condições Climáticas	71
4.2 Parâmetros Físicos	73
4.2.1 Temperatura	73
4.2.2 Teor de Umidade	76
4.3 Parâmetros Físico-Químicos	79
4.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH)	79
4.3.2 Sólidos Voláteis	81
4.3.3 DBO e DQO	83
4.4 Parâmetros Químicos	86
4.4.1 Metais	86
4.5 Parâmetros Microbiológicos	88
4.5.1 Coliformes Totais e Termotolerantes	89
4.5.2 Aeróbios Totais	90
4.5.3 Fungos	92
4.6 Toxicidade e Biodegradação	93
4.7 Estatística	98
5. CONCLUSÕES	103
6. REFERÊNCIAS	106
7. ANEXO	113

1. INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Gerais

O crescimento populacional e o desenvolvimento industrial são os principais fatores que dão origem a produção do lixo urbano, decorrente da atividade consumista da sociedade, tendo como consequência a degradação do meio ambiente.

Os problemas associados aos resíduos, segundo Figueiredo (1995), decorrem não só de sua geração, mas também de sua evolução qualitativa, ou seja, do tipo de lixo que é produzido.

Os aterros sanitários são uma alternativa adequada e segura para a disposição final do lixo, no entanto em cidades como Campina Grande na Paraíba, o destino desses resíduos é realizado em locais a céu aberto, denominados “lixão”, visto que causa contaminação do solo e corpos d’água superficiais e subterrâneos, proliferação de vetores e instalação de comunidades de catadores, geração de gases etc. (SILVEIRA, 2004). Essa alternativa não engloba nenhum tipo de tratamento que contribua para a melhoria dos danos ambientais e solução de problemas causados ao homem.

No intuito de conhecer melhor o funcionamento de aterros de resíduos sólidos urbanos (RSU), células experimentais (biorreatores ou lisímetros) representam uma técnica bastante interessante, pois permitem obter parâmetros para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros. Além disso, normas técnicas que hoje são muitas vezes inadequadas devem ser reformuladas ou aprimoradas a partir dos estudos desenvolvidos em células experimentais (MONTEIRO, 2003). As pesquisas desenvolvidas em biorreatores envolvem a busca de alternativas tecnológicas que poderão ser adaptadas não apenas para grandes aterros, mas também para aterros de pequeno e médio porte, como é o caso da cidade de Campina Grande. Os aterros para municípios de pequeno e médio porte devem ser projetados com base em tecnologias apropriadas que associem a simplicidade operacional, baseada em procedimentos científicos, à flexibilidade necessária para

compatibilizar o projeto, a operação, os requisitos ambientais e as potencialidades locais (LEITE, 2008).

Os lisímetros representam uma técnica bastante interessante e são empregadas para estudar o comportamento dos resíduos e contribuir para uma melhor compreensão do metabolismo de degradação dos produtos orgânicos (ALCÂNTARA, 2007).

Quando o lixo é depositado no aterro inicia-se o processo de biodegradação, que compreende reações físicas, químicas e biológicas, que resultam na produção de lixiviado e de gases, devido a transformação dos resíduos orgânicos a compostos, com menor peso molecular como dióxido de carbono, metano, oxigênio, entre outros (MELO, 2003).

Visto que os problemas ocasionados pelos resíduos sólidos geram conseqüências ao meio ambiente e a população humana, este trabalho pretende avaliar parâmetros dos RSU da cidade de Campina Grande para verificar a importância dos microrganismos no processo de biodegradação.

O campo experimental onde foram desenvolvidas as pesquisas foi o EXTRABES (Núcleo de pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande) localizado em terreno pertencente à Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba- CAGEPA, contando com o apoio de uma equipe multidisciplinar, como professores e alunos de iniciação científica da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) e Universidade Estadual da Paraíba (UEPB).

1.2 Objetivos da pesquisa

O presente trabalho tem como objetivo geral verificar e monitorar o processo de biodegradação dos resíduos sólidos urbanos, na cidade de Campina Grande - PB, através do comportamento de processos físicos, químicos e microbiológicos em um lisímetro em escala reduzida.

Dentro deste contexto a pesquisa teve como objetivos específicos:

- Avaliar o processo biodegradativo dos resíduos depositados no lisímetro, correlacionando parâmetros que influenciem neste comportamento;
- Analisar parâmetros físicos e químicos que influenciam na cinética degradativa da matéria orgânica.
- Determinar a evolução do crescimento microbiano em diferentes profundidades do bioreator;
- Estudar aspectos quantitativos e qualitativos dos resíduos por meio de análises microbiológicas;

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Resíduos sólidos

O senso comum entende que o lixo é qualquer objeto sem valor ou utilidade, ou detrito oriundos de atividades domésticos, industriais etc., o que se joga fora, escória. (HOUISS, 2001). Uma conceituação mais elaborada expressa o lixo como resíduos sólidos urbanos produzidos individual ou coletivamente, pela ação humana, animal ou por fenômenos naturais, nocivos a saúde, ao meio ambiente e ao bem estar da população urbana, não enquadrada como resíduos especiais (KAPAZ, 2001).

De maneira formal, o conceito de lixo está inserido no Brasil dentro da definição de resíduos sólidos dada pela Associação Brasileira das Normas Técnicas – ABNT (ABNT, 2004):

...“resíduos sólidos ou semi-sólidos são aqueles que resultam da atividade da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de águas, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgoto ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis em face de melhor tecnologia disponível.”

De acordo com Faria (2002), esta definição é muito ampla e pode estar equivocada ao incluir líquidos como resíduos sólidos. Sob sua percepção lixo é todo e qualquer resíduo resultantes das atividades diárias do homem na sociedade. Este são, na maior parte das vezes, restos alimentares, papéis e papelões, plásticos, trapos, couros, madeiras, latas, vidros, lamas, gases e vapores, poeiras, sabões e detergentes, bem como outras substâncias descartadas de forma consciente.

A geração de resíduos sólidos vem apresentando números crescentes nas várias regiões do país e traz consigo um grande desafio às autoridades municipais, desde a promoção da coleta dos resíduos gerados, até a determinação de áreas adequadas à disposição.

2.1.1 Classificação dos resíduos sólidos

De acordo com a definição da ABNT em sua norma NBR-10.004/2004, os resíduos sólidos podem ser classificados em:

- Resíduos Classe I – Perigosos: são os chamados resíduos perigosos por apresentarem periculosidade quanto à inflamabilidade, reatividade, toxicidade, patogenicidade ou corrosividade;

- Resíduos Classe II – Não Perigosos
 - a. Resíduos Classe II A – Não Inertes: são os resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – Perigosos ou resíduos de classe II B – Inertes. Podem ter propriedades tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água;
 - b. Resíduos Classe II B – Inertes: são os resíduos que quando amostrados de uma forma representativa, submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, não tiveram nenhum de seus constituintes solubilizados em concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor.

Outra forma de classificação dos resíduos é quanto à origem: domiciliar, público, comercial, industrial, serviços de saúde e hospitalar, portos, aeroportos,

terminais ferroviários e rodoviários, industriais, agrícolas e de construção civil (entulhos).

De acordo com Ferreira (2006), os contaminantes são substâncias geradas por resíduos resultantes de fontes de poluição, que têm como origem atividades humanas, industriais e agrícolas, dispostos em lixões ou em aterros de RSU, podendo ser classificados como:

- Orgânicos são originados principalmente da decomposição de plantas e animais. Matéria orgânica, potencialmente ativa, capaz de entrar em decomposição (resíduos e esgotos domésticos, resíduos de podas e jardinagem, lodos de ETE, excrementos humanos e animais).
- Inorgânicos são substâncias químicas minerais ou bioquímicas, relativamente estáveis ou capazes de alterar as condições físico-químicas e biológicas do meio (resíduos industriais de metalúrgicas, refinarias de petróleo, mineração, coquearias). Apresentando-se no percolado como materiais suspensos ou dissolvidos.

Resíduos tóxicos por sua vez são vários metais e compostos químicos despejados como subprodutos de processos industriais. Cádmiu, mercúrio, cromo, ferro e chumbo, substâncias presentes nos produtos de limpeza domésticos, como alvejantes, soda cáustica e pesticidas, além de herbicidas e inseticidas, e resíduos de serviços de saúde. Além de substâncias químicas como os PCBs e o DDT que são letais para alguns organismos e interferem nos processos biológicos normais dos organismos.

2.2 Resíduos sólidos urbanos (RSU)

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) são aqueles gerados pela comunidade, com exceção de resíduos industriais, de mineração e agrícolas. Incluem os resíduos de origem doméstica e resíduos procedentes de: comércio, escritórios,

serviços, limpeza de vias públicas, mercados, feiras e festejos, bem como móveis, matérias e eletrodomésticos inutilizados (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

Segundo Alcântara (2007), os impactos ambientais negativos relacionados ao lixo surgiram juntamente com o aparecimento dos primeiros aglomerados humanos e foram se intensificando com o surgimento das aldeias, vilas, cidades e grandes regiões metropolitanas. Atualmente o problema se agrava, não só porque são produzidas maiores quantidades de resíduos por habitantes, mais também porque esses resíduos possuem cada vez mais substâncias recalcitrantes e que apresentam propriedades tóxicas.

Pode-se afirmar que a origem e as características dos RSU estão condicionadas a uma série de fatores, desde as condições climáticas da região, que influenciam diretamente a qualidade e a quantidade dos resíduos sólidos, até à densidade populacional e suas condições sociais e econômicas (LEITE, 1998).

Esses resíduos, denominados vulgarmente de lixo e que se constituem numa mistura heterogênea de matérias sólidos que podem ser parcialmente reciclados e/ou reutilizados, vem se constituindo em um dos maiores problemas da sociedade moderna (ALCÂNTARA, 2007).

A industrialização e o crescimento econômico e demográfico das cidades têm aumentado a produção de RSU, agravando o desafio de dispor de maneira segura e adequada a crescente produção desses resíduos (CARVALHO, 1999).

No Brasil a realidade das cidades é de que 63,8% são de lixões a céu aberto, 18,4% de aterros controlados, 13,8% de aterros sanitários (IBGE, 2000). De acordo com Lins (2005), a geração de RSU varia na ordem de 500 a 1000g/hab.dia, dependendo da região. A estimativa dessa proporção no Brasil é de 1350 g/hab.dia e na região do nordeste, de 870g/hab.dia (JUCÁ, 2002).

No município de Campina Grande, localizado no estado da Paraíba são produzidos em média 240 toneladas de resíduos por dia, com taxa de produção *per capita* de aproximadamente 540g/hab.dia (LEITE *et al.*, 2008).

2.3 Disposição final de RSU

A disposição adequada de RSU requer um projeto convenientemente desenvolvido, o qual deve englobar conceitos relativos às obras de engenharia, conhecimento de geotecnia, investigação de campo e estudos laboratoriais, abrangendo ainda aspectos ambientais, econômicos, políticos e sociais e necessitando de uma equipe de profissionais especializados.

A geração crescente e diversificada de resíduos sólidos nos meios urbanos e a necessidade de disposição final alinham-se entre os mais sérios problemas ambientais enfrentados indistintamente por países ricos e industrializados e pelas sociedades em desenvolvimento.

A descarga do lixo nas cidades de todo o mundo sempre representou sério problema à saúde pública e ao meio ambiente. Depósitos em áreas urbanas durante séculos sem os devidos cuidados de engenharia e saúde pública, sempre estiveram associados segundo James (1997) à propagação de doenças.

As formas de disposição mais conhecidas e utilizadas dos resíduos sólidos urbanos são:

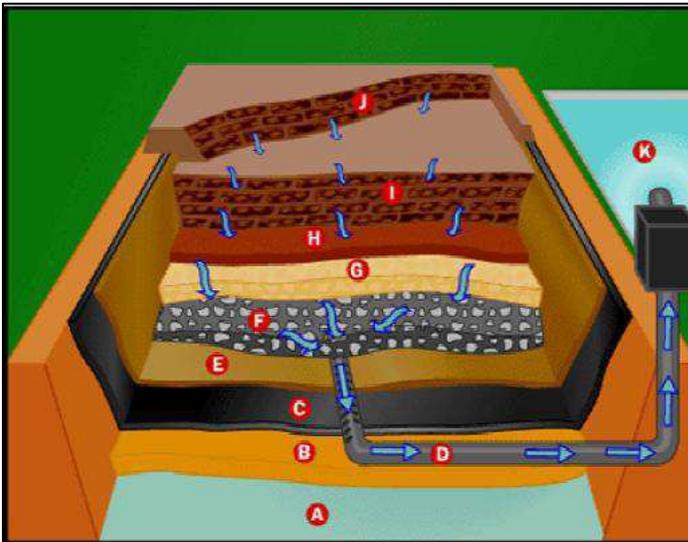
- **Lixões:** é uma forma inadequada de disposição final de resíduos sólidos a céu aberto, que se caracteriza pela simples descarga do lixo sobre o solo, sem medidas de proteção ao meio ambiente ou à saúde pública. Não existe nenhum controle quanto aos tipos de resíduos depositados e quanto ao local de disposição destes. Nesses casos, resíduos domiciliares e comerciais de baixa periculosidade são depositados juntamente com os industriais e hospitalares, de alto poder poluidor. Nos lixões pode haver outros problemas associados, como por exemplo a presença de animais (inclusive a criação de porcos), a presença de catadores (que na maioria dos casos residem no local), além de riscos de incêndios causados pelos gases gerados pela decomposição dos resíduos e de escorregamentos, quando da formação de pilhas muito íngremes, sem critérios técnicos.

- **Aterro controlado:** é menos prejudicial que os lixões pelo fato dos resíduos dispostos no solo serem cobertos com uma camada de terra na conclusão da jornada de trabalho ou a intervalos menores, se necessário. O que pode reduzir a poluição do local, porém trata-se de solução primária para o problema do descarte dos RSU, não devendo ser priorizado por não ser a técnica mais adequada para evitar danos ambientais.
- **Aterro sanitário:** é a alternativa que reúne as maiores vantagens considerando a redução dos impactos ocasionados pelo descarte dos resíduos sólidos urbanos, apresentando características como subdivisão da área de aterro em células de lixo; disposição dos resíduos no solo previamente preparado para que se torne impermeável, impossibilitando o contato dos líquidos residuais (água das chuvas e lixiviados) com o lençol freático; presença de lagoas de estabilização para a biodegradação da matéria orgânica contida nos líquidos residuais; presença de drenos superficiais para a coleta da água das chuvas; drenos de fundo para a coleta do lixiviado e para a dispersão do metano, coletores dos líquidos residuais em direção as lagoas de estabilização, confinamento do lixo em camadas cobertas com solo vegetal.
- **Incineração:** consiste na queima dos detritos em um incinerador ou usina de incineração, a temperaturas superiores a 900°C com vantagens do método podem-se citar a redução significativa do volume dos dejetos municipais (principalmente cinzas de compostos orgânicos e aglomerados inorgânicos solidificados), a diminuição do potencial tóxico dos dejetos e a possibilidade de utilização da energia liberada com a queima. O uso desta técnica no Brasil é bastante incipiente em torno de 30 municípios optaram por incinerar seus resíduos sólidos.

2.4 Aterro Sanitário de RSU

De acordo com a norma da ABNT NBR 8.149/1992, o aterro sanitário é considerado como uma técnica de disposição de RSU no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário.

A norma brasileira NBR13896/1997 fixa as condições mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos não perigosos, de forma a proteger adequadamente as coleções hídricas superficiais e subterrâneas próximas, bem como os operadores destas instalações e populações vizinhas. A Figura 1 ilustra a estrutura de um aterro sanitário para RSU, sem a cobertura final e as setas indicam o fluxo do percolato gerado.



A = lençol freático;

D = sistema de coleta de percolados;

B, C, E, F, G e H = camada de proteção impermeabilizante;

I e J = camadas de resíduos intercaladas pela cobertura diária;

K = tratamento de percolato (lagoa de estabilização).

Figura 1: Estrutura de um aterro sanitário de RSU e o fluxo do percolato.

Fonte: Adaptado de (FERREIRA, M. A. S., 2006) <http://howstuffworks.com/landfill.htm> (2005)

O aterro de RSU é um sistema dinâmico que envolve reações metabólicas em um ambiente formado pela massa de resíduos com suas características físicas, químicas e suas inter-relações, formando um sistema complexo, de acordo com a Figura 2 (ALCÂNTARA 2007). Dentro do ecossistema do aterro de RSU, durante o processo de degradação, são estabelecidas relações físicas, químicas e biológicas, que acontecem ao longo do tempo, como também existe os fatores ambientais que estabelecem relações entre o ambiente externo, interno e a massa de lixo, interferindo na biodegradação (MONTEIRO, 2003).

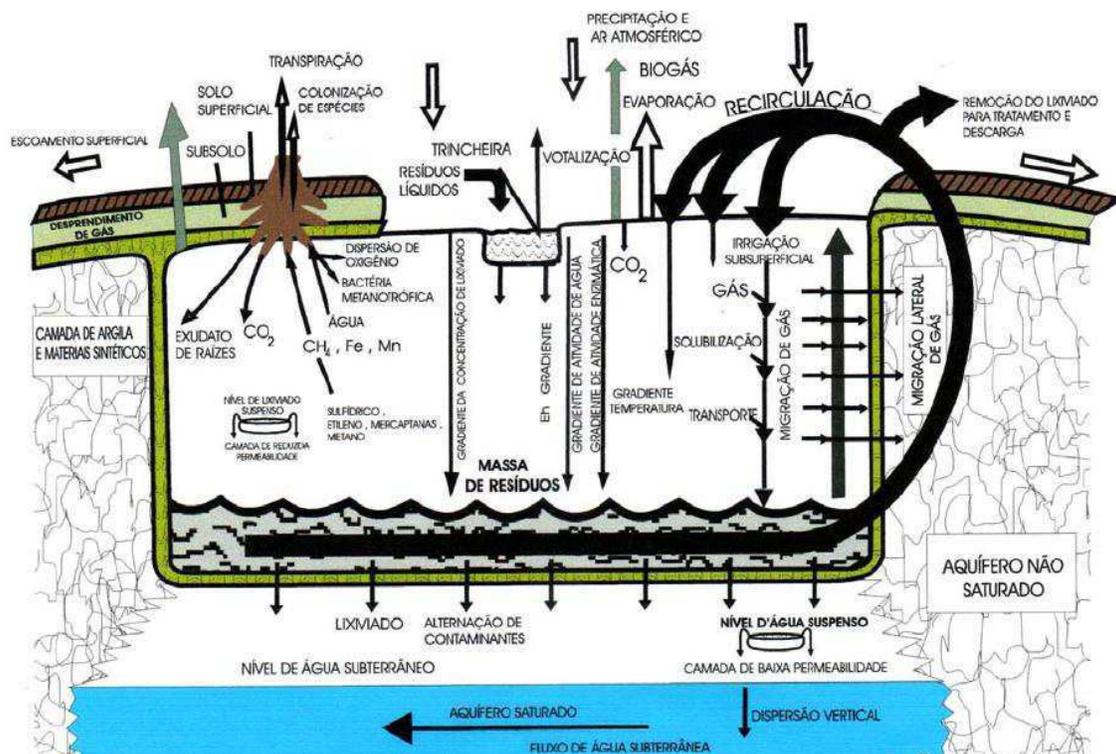


Figura 2: Representação esquemática do ecossistema aterro sanitário (SENIOR & BALBA, 1987).

2.5 Impactos Ambientais, Econômicos e Sociais associados aos RSU

Segundo Pereira (1999) os impactos gerados pela falta de manejo dos resíduos sólidos urbanos são bastante variados e envolvem aspectos sanitários, ambientais, econômicos e sociais.

Os impactos sanitários são mais contundentes junto às populações gerando as chamadas doenças de saúde pública. Sabe-se que os RSU são veiculadores de doenças, propriedade que se torna mais intensa face à proliferação dos vetores biológicos (moscas, mosquitos, baratas, ratos) transmissores de bactérias e fungos de características patogênicas. O excesso de matéria orgânica presentes no RSU, principalmente em países subdesenvolvidos, constitui-se em habitat ideal para proliferação desses vetores.

Os impactos ambientais se destacam a contaminação da fauna e da flora na poluição dos solos e corpos hídricos (superficiais e subterrâneos) provocado por lixiviados como chorume, resinas e tintas, desestabilizando os ambientes naturais. Em alguns casos a poluição pode ser irreversível, tanto para os aquíferos quanto para os mananciais de superfícies (córregos, rios, lagos), devido à dissolução de substâncias químicas, as quais não são retiradas nem mesmo pelos sistemas de tratamento de águas usuais.

Os impactos econômicos oriundos da falta de tratamento adequado dos RSU são perfeitamente visíveis, quando se considerar os gastos inúteis com tratamentos de saúde para a população carente e, esta voltará a se contaminar se não tiver melhorias efetivas do seu estado nutricional, caso o lixão da área onde moram não seja erradicado. Outro problema bastante comum é a desvalorização das terras próximas às áreas dos lixões, assim como a conseqüente redução de investimentos imobiliários.

Quanto aos impactos sociais tem-se a prática condenável da catação de resíduos em ruas, avenidas, mercados, feiras e nos próprios lixões, realizada por homens, mulheres e crianças que vivem em condições subumanas em contato com materiais contaminados e perigosos (lixo tóxico e hospitalar).

2.6 Lisímetros e Biorreatores

Os lisímetros são considerados modelos de aterros em escala laboratorial que têm a capacidade de simular e acelerar a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos, facilitando o conhecimento dos processos microbiológicos (BARLAZ *et al.*, 1989). Portanto, constitui uma célula experimental de lixo em escala reduzida, dotado de sistemas de drenagem de líquidos e gases, medição do nível dos líquidos, medidores de recalque, temperatura, concentração e fluxo de gases, proporcionando o conhecimento de diversos parâmetros sob condições controladas (MONTEIRO 2003).

Vários parâmetros podem ser analisados através dos lisímetros e a influência da água na degradação do lixo é um deles, como também a influência da recirculação do lixiviado e produção de biogás.

De acordo com Borglin *et al* (2004) os biorreatores otimizam as condições para decomposição microbiológica e aceleram a estabilização da massa de lixo permitindo a disposição adicional de resíduos sólidos urbanos ou reuso mais rápido do aterro. São projetados geralmente para que a água de infiltração da chuva nos resíduos seja feita sob condições controladas. O gerenciamento adequado destes parâmetros pode levar a estabilização muito rápida dos resíduos e a ritmos de alta produção de metano. Em seus estudos foi usado um sistema de biorreatores que otimizaram os parâmetros da biodegradação medindo índices de degradação, índices de geração CO₂, e qualidade de lixiviado. Os autores utilizaram três lisímetros de 200L. Três tratamentos foram aplicados aos biorreatores: condição aeróbia (injeção de ar com adição de água e recirculação do lixiviado), condição anaeróbia (sem injeção de ar, adição de água, e recirculação de lixiviado), e nenhum tratamento (sem injeção ar ou recirculação de lixiviado).

Alcântara (2007) em sua pesquisa abordou o comportamento geral de aterros simulados (lisímetros) e o processo evolutivo de degradação dos resíduos aterrados, considerando-se as condições climáticas e a composição dos resíduos. Os experimentos, operados em condições de campo, foram montados na área do

Aterro de Resíduos Sólidos de Muribeca, localizado no município de Jaboatão dos Guararapes (PE), que faz parte da Região Metropolitana do Recife. Um dos lisímetros foi construído em agosto de 2004, no final do período chuvoso, e o outro, em julho de 2005, em pleno período de chuvas. No primeiro, utilizaram-se resíduos com 45% de matéria orgânica e, no outro, com 59%. Foram analisados os dados da caracterização dos elementos que compõem os aterros simulados e os resultados do monitoramento de sólidos, líquidos e gases, que envolveu medições de campo e coleta periódica de amostras para análises laboratoriais de vários parâmetros.

Normas técnicas que hoje são muitas vezes inadequadas podem ser reformuladas ou aprimoradas a partir dos estudos desenvolvidos em cima de células experimentais, além do mais rotas metabólicas de degradação de produtos orgânicos serão melhor compreendidas e possivelmente modificadas para uma melhor eficiência na decomposição da matéria orgânica. Neste sentido, vem-se buscando técnicas para aprimorar a disposição e o tratamento de resíduos sólidos através do uso de experimentos em escala de laboratório, escala piloto e escala real. As técnicas de tratamento estão cada vez mais interligadas a aspectos geotécnicos e biotecnológicos (MONTEIRO *et al.*, 2006).

2.7 Biodegradação em RSU

A biodegradação da massa de lixo se dá pela ação conjunta de diferentes grupos de microrganismos, sejam eles: fungos e bactérias. Assim que ocorre a disposição dos RSU, estão presentes os microrganismos aeróbios, onde existe uma fonte de oxigênio (oxidante) para suas atividades metabólicas. Após um determinado tempo há proliferação de organismos anaeróbios, que degradam a matéria orgânica sem presença de oxigênio e perduram durante toda a vida em um aterro (MELO 2003).

De acordo com Hirsch (2002) a biodegradação em aterros sanitários pode-se dividir em duas fases: a primeira, denominada aeróbia, que começa antes de depositados os resíduos no aterro sanitário, e se deve a presença de microrganismos nos resíduos sólidos e nos solos de cobertura. A segunda fase, denominada anaeróbia, começa quando o oxigênio residente nas porosidades se esgota por consumo dos microrganismos ou foi expulso dos vazios por processo de compressão. Durante o resto do processo a biodegradação não cessará até que o substrato esteja completamente degradado pelas bactérias que dele se alimentam, ou as condições ambientais que impeçam as atividades destes microrganismos.

Segundo McBean *et al.* (1995) *apud* Monteiro (2003) descrevem os princípios da decomposição do lixo em aterros sanitários, comparando-os a reatores bioquímicos, pois separam o processo em três fases: aeróbia, anaeróbia ácida e anaeróbia metanogênica. A fase aeróbia apresenta curta duração e é responsável por uma parcela reduzida da decomposição. A reação da matéria degradável com o oxigênio produz dióxido de carbono, água, materiais parcialmente degradáveis e biomassa, além de promover uma elevação da temperatura do meio, de acordo com a Figura 3.

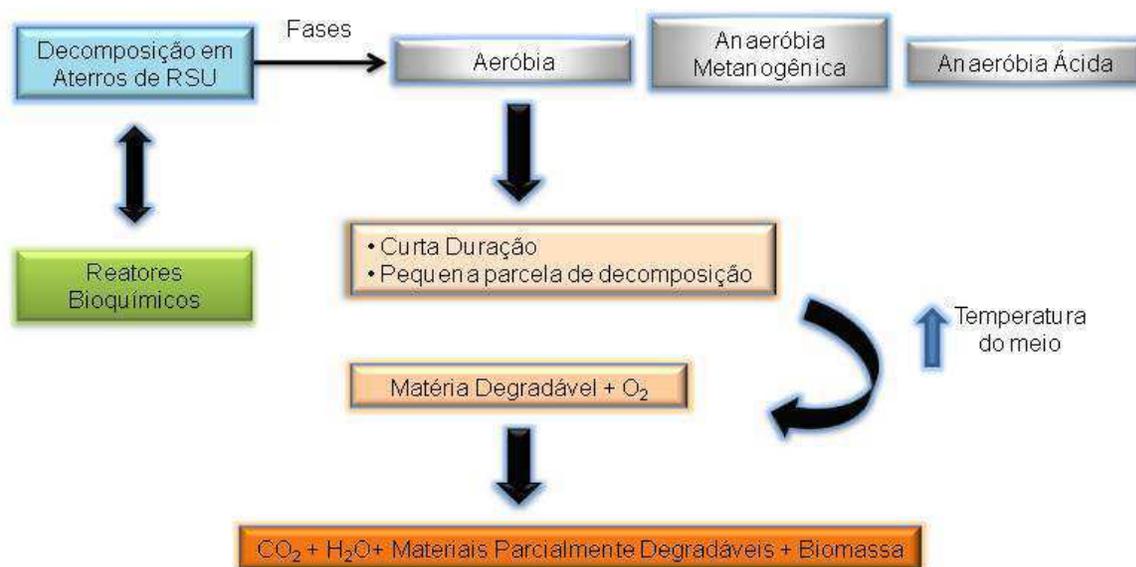


Figura 3: Decomposição e fase aeróbia em aterros sanitários (MONTEIRO, 2003)

A digestão anaeróbia pode ser considerada como um sistema complexo onde diversos grupos de microrganismos trabalham interativamente na conversão da matéria orgânica complexa em metano, água, gás sulfídrico e amônia além de novas células bacterianas (SIMÕES, 2000). Os microrganismos que participam do processo de decomposição anaeróbia podem ser divididos em três importantes grupos de bactérias:

- **Bactérias fermentativas** que transformam por hidrólise, os polímeros em monômeros, e estes em acetato, hidrogênio, dióxido de carbono, ácidos orgânicos de cadeia curta, aminoácidos e outros produtos como glicose;
- **Bactérias acetogênicas** produtoras de hidrogênio, o qual converte os produtos gerados pelo primeiro grupo (aminoácidos, açúcares, ácidos orgânicos e álcoois) em acetato, hidrogênio e dióxido de carbono;
- **Bactérias metanogênicas** que utilizam os substratos produzidos pelas bactérias acetogênicas, transformando-os em metano e dióxido de carbono. Essas bactérias são muito importantes para o processo, pois elas produzem um gás insolúvel (metano), possibilitando a remoção do carbono orgânico no ambiente, resultando a perda de massa, e utilizam o hidrogênio favorecendo o ambiente para que as bactérias acidogênicas fermentem compostos orgânicos com a produção de ácido acético, que é convertido em metano.

De acordo com Pohland & Harper (1986) *apud* Alcântara (2007) são conhecidas nove etapas do processo de degradação anaeróbia, entretanto, diversos autores (ZEHNDER, 1983; REES, 1980; GUJER & ZEHNDER, 1983; ZINDER, 199; PALMISANO *et al.*, 1993; BARLAZ, 1996; SPEECE, 1996; NOPHARATANA *et al.*, 2007) costumam subdividir em quatro etapas, apresentadas a seguir (Figura 4):

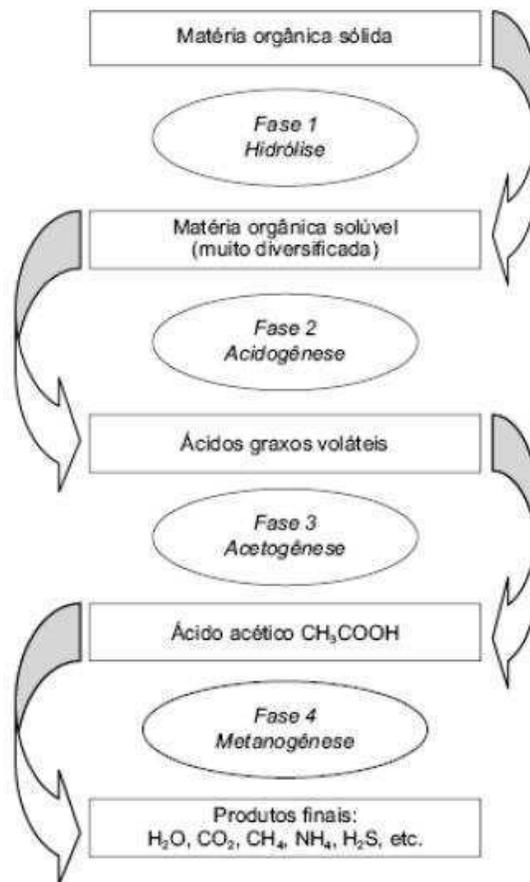


Figura 4: Fluxograma do processo de decomposição anaeróbia nos RSU (CASTILHOS JR, 2003).

Fase 1: Hidrólise enzimática

A hidrólise é a etapa inicial e sua velocidade pode limitar todo o processo de digestão anaeróbia. Nesta fase, as bactérias fermentativas liberam exoenzimas, que promovem a transformação de compostos de alto peso molecular (lipídios, polissacarídeos, proteínas, etc) em compostos dissolvidos mais simples (ácidos graxos de cadeia longa, açúcares solúveis, aminoácidos, etc) que podem ser utilizados no metabolismo bacteriano através dos mecanismos de anabolismo e catabolismo (ALCÂNTARA 2007). Uma vez transformados em compostos mais simples, estes podem atravessar a parede das bactérias fermentativas. Nesta fase, vários são os fatores que interferem na velocidade que ocorre a hidrólise,

tais como temperatura operacional, tempo de residência, composição do substrato, tamanho das partículas e pH do meio.

Fase 2: Acidogênese

Os compostos solubilizados na hidrólise são metabolizados pelos microrganismos fermentativos, anaeróbios estritos e facultativos, gerando produtos orgânicos de baixo peso molecular, tais como ácidos graxos de cadeia curta, alcoóis, hidrogênio, sulfeto de hidrogênio, dióxido de carbono, além de novas células bacterianas.

Fase 3: Acetogênese

Apesar de o termo acetogênese ter sido primeiramente utilizado para descrever qualquer reação que origina o acetato, no entanto, considera-se que a acetogênese ocorre pela ação de um grupo específico de bactérias anaeróbias estritas, denominadas de acetogênicas (MEGONIGAL *et al.*, 2004 *apud* ALCÂNTARA 2007). Portanto, nesta fase, têm-se a conversão dos produtos da acidogênese em compostos que formam o substrato apropriado para as bactérias metanogênicas a fim de produzir metano tais como: acetato, hidrogênio e dióxido de carbono (MELO, 2003).

Fase 4: Metanogênese

Essa etapa, que é considerada a última do processo de digestão anaeróbia, acontece a produção de dois gases: o metano e o dióxido de carbono, dos quais pertencem a dois grupos de bactérias: as acetoclásticas que é quando o metano é produzido a partir da redução do ácido acético, gerando também o dióxido de carbono; e as hidrogenotróficas, que utilizam o hidrogênio e dióxido de carbono, produzindo assim metano e água.

A Figura 5 mostra o esquema resumido da seqüência de processos metabólicos e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (MELO, 2003).

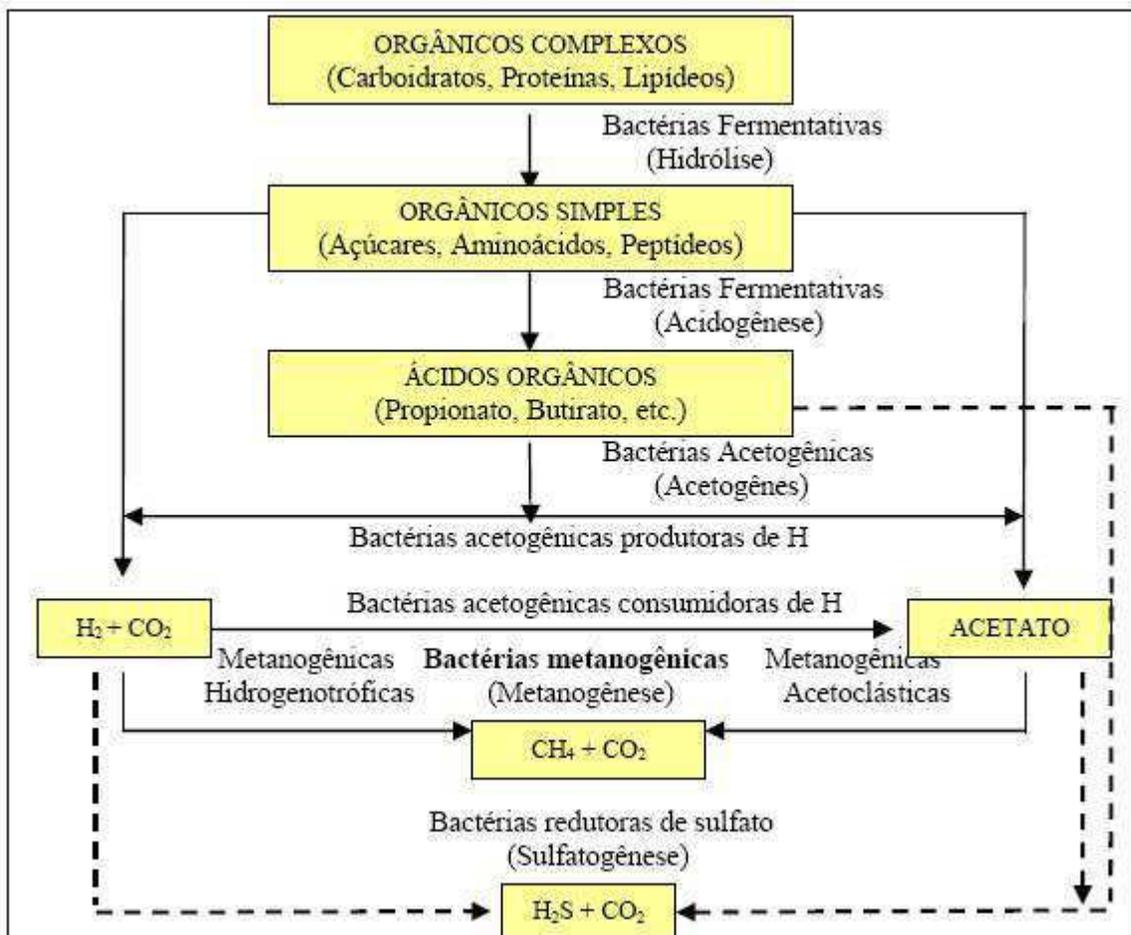


Figura 5: Seqüência das rotas metabólicas e grupos microbianos envolvidos na digestão anaeróbia (CHERNICHARO, 1993 *apud* MELO, 2003).

Os organismos da biodigestão anaeróbia apresentam um elevado grau de especialização metabólica. A eficiência do processo anaeróbio depende, portanto, das interações positivas entre as diversas espécies bacterianas, com diferentes capacidades degradativas. Os intermediários metabólicos de um grupo de bactérias podem servir como nutrientes ao crescimento de outras espécies. Assim, a ocorrência de várias reações de degradação dos compostos orgânicos e a

dependência dessas bactérias da presença do hidrogênio formado no sistema (VAZOLLER 2001).

Embora essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite bastante o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos resíduos sólidos urbanos e seus impactos sobre a composição dos lixiviados e das emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas. Isto ocorre na medida em que sempre há o aterramento de resíduos sólidos novos, causando grande variabilidade na idade do material disposto, não sendo difícil encontrar as três fases ocorrendo simultaneamente em um único aterro (CASTILHOS JR, 2002 *apud* LEITE, 2008).

FARQUAR e ROVERS (1973) *apud* PAES (2003), mostram ainda que as fases da degradação da matéria orgânica no caso específico de substratos sólidos confinadas em aterros sanitários são as seguintes:

Fase I – aeróbia: inicia-se com uma predominância de fungos e bactérias, dada a presença de oxigênio difundido no meio da massa sólida, permanecendo assim durante algumas semanas ou até poucos meses, até que, em função da cobertura diária do lixo e da atividade dos microrganismos, passam assim a vigorar as condições anaeróbias. A atividade dos microrganismos leva a produção de CO₂ e água, ao consumo de oxigênio e a elevação da temperatura;

Fase II – anaeróbia não metanogênica: nesta fase começa a predominar as condições anaeróbias, com um aumento significativo na produção de dióxido de carbono e hidrogênio pelos microrganismos aeróbios facultativos. A glicose da primeira fase é metabolizada por este grupo. Ocorre formação de ácidos, com conseqüente queda do pH e simultaneamente se observa acentuado decréscimo de oxigênio livre, que tende a zero;

Fase III – anaeróbia metanogênica (instável): esta fase é caracterizada pela primeira evidência da produção de metano havendo, em conseqüência, redução nas produções de dióxido de carbono e hidrogênio. Há uma produção acentuada de acetato, formiato, hidrogênio e dióxido de carbono, até chegar a fase metanogênica estável.

Fase IV – anaeróbia metanogênica (estável): as produções de metano e dióxido de carbono atingem uma composição constante sugerindo, segundo os autores, que na massa de resíduos que está sendo degradada, estejam prevalecendo as atividades das metanobactérias.

POHLAND & GOULD (1986) acrescentaram uma quinta fase ao modelo apresentado por FARQUAR e ROVERS (1973), denominada “maturação final” (PAES, 2003). Esta fase consiste no estágio final de estabilização em aterros, nutrientes e substratos disponíveis tornam-se limitados e a atividade biológica é reduzida. A produção de gás diminui e o chorume permanece com concentrações mais baixas, o oxigênio e espécies oxidativas podem reaparecer vagarosamente. Contudo, a lenta degradação de frações orgânicas resistentes pode continuar com a produção de substâncias húmicas.

2.7.1 Curva do crescimento bacteriano em RSU

De acordo com Melo (2003) as culturas bacterianas crescem exponencialmente durante o crescimento ativo, aumentando em progressão geométrica, sendo este crescimento influenciado pela composição nutricional do meio e pelas condições físicas. Se o crescimento bacteriano ocorre num sistema fechado, ou seja, sem a entrada de novos nutrientes, bem como a remoção dos metabólitos gerados no processo, ocorre a exaustão do sistema. Durante o crescimento, a população em um sistema fechado é balanceada, havendo um

aumento ordenado em todos os constituintes de cada célula microbiana. Quando é atingida a população máxima, verifica-se a exaustão de nutrientes e a intoxicação pelos produtos metabólicos gerados pelos próprios microrganismos. A reprodução é inibida e começa a morte celular.

A cinética do crescimento de microrganismos em aterros de RSU para uma determinada massa de resíduos ocorre em quatro fases distintas de crescimento em função do tempo (Figura 6): lag, log, estacionária e declínio.



Figura 6: Curva do crescimento microbiano mostrando as quatro fases (KYAW, 2006).

Fase lag: período variável, onde ainda não há um aumento significativo da população. Ao contrário, é um período onde o número de organismos permanece praticamente inalterado. Esta fase também é observada quando as células sofrem traumas físicos (choque térmico, radiações) ou químicos (produtos tóxicos), ou quando são transferidas de um meio rico para outro de composição mais pobre. É uma fase onde há a adaptação microbiana ao meio imposto e se deve a atividade metabólica dos microrganismos para adaptar-se ao novo ambiente, antes de

poder duplicar-se. Essa adaptação é necessária, pois os organismos sintetizam enzimas extracelulares a fim de degradar as substâncias presentes no meio. Para a produção desta enzima, leva-se algum tempo, por isso não há crescimento bacteriano e sim uma preparação para este crescimento.

Fase log ou exponencial: nesta etapa, as células estão plenamente adaptadas, absorvendo os nutrientes, sintetizando seus constituintes, crescendo e se duplicando. Deve ser levado em conta também que neste momento, a quantidade de produtos finais de metabolismo ainda é pequena. Diminui-se o oxigênio e inicia-se o desaparecimento de microrganismos aeróbios e surgimento de anaeróbios degradadores de macromoléculas. Os microrganismos alcançam uma velocidade constante do crescimento, pois as células iniciam seu processo de divisão, entrando no período de crescimento exponencial ou logarítmico.

Fase estacionária: nesta fase, os nutrientes estão escasseando e os produtos tóxicos estão tornando-se mais abundantes. Nesta etapa não há um crescimento líquido da população, ou seja, o número de células que se divide é equivalente ao número de células que morrem. Diversos fatores podem intervir na fase log e diminuir sua atividade, entre eles tem-se: o término de nutrientes, o acúmulo de produtos de degradação, assim como mudanças no pH que podem ser danosas as células.

Fase de declínio ou morte celular: a maioria das células está em processo de morte, embora outras ainda estejam se dividindo, portanto o número de células mortas excede ao de células novas. Vários são os fatores que determinam esta fase, entre eles estão a diminuição do substrato, subprodutos do metabolismo que se tornam tóxicos quando em altas concentrações.

2.8 Fatores Intervenientes no Processo Biodegradativo

Embora seja um processo natural, a decomposição dos RSU em um aterro sanitário é um processo complexo e para que ocorra um crescimento bacteriano satisfatório, todos os microrganismos necessitam de condições mínimas para sobrevivência e posterior reprodução. Portanto, as fontes de nutrientes, oxigênio, pH, umidade e temperatura ideais são fatores essenciais para o seu desenvolvimento (MELO 2003). Dentre esses fatores, têm-se algumas propriedades que interferem no processo biodegradativo.

2.8.1 Temperatura

A temperatura é um parâmetro físico de grande importância, interfere nos processos biológicos, reações químicas e bioquímicas.

Temperaturas altas diminuem a concentração de oxigênio dissolvido e interferem na velocidade de degradação, elevando a atividade dos microrganismos anaeróbios. Temperaturas baixas (menores que 30°C) podem retardar o processo de digestão (FERREIRA, 2006).

Em pequenas profundidades e próximo da camada de cobertura final, a temperatura dos RSU varia em função das mudanças sazonais (SILVA, 2005). Temperaturas continuamente mais elevadas são observadas em profundidades maiores e em locais onde há umidade disponível. Os estudos de WARITH (2002) demonstraram que em aterros profundos, que possuam fluxo de água moderado, temperaturas de 30 a 40°C são esperadas, mesmo em climas temperados.

MARIANO e JUCÁ (1998) relatam que no aterro da Muribeca na região metropolitana do Recife, até 5 m de profundidade, a temperatura no interior do aterro não é aparentemente afetada pelas variações da temperatura ambiente e de 5 a 10 m de profundidade a temperatura varia entre 30° a 60°, já a partir de 10 m tende a estabilizar.

A temperatura é um parâmetro de grande importância na digestão anaeróbia, afeta os processos biológicos e bioquímicos de diversas maneiras. Pode-se citar dentre seus principais efeitos, as alterações da velocidade no metabolismo das bactérias, o equilíbrio iônico e a solubilidade dos substratos (PAES, 2003).

A atividade enzimática das bactérias depende estreitamente da temperatura, alterações bruscas de temperatura causam desequilíbrio nas culturas envolvidas, principalmente nas bactérias formadoras de metano. Em torno de 10°C essa atividade é muito reduzida e, acima de 65°C, as enzimas são desnaturadas pelo calor (CASTILHOS, 2003).

Assim, todos os microrganismos apresentam uma faixa de temperatura onde se desenvolvem plenamente. Nesta faixa de temperatura pode-se determinar, de acordo com a Figura 7, as temperaturas mínima, ótima e máxima, para cada microrganismo. A temperatura mínima reflete o trabalho das enzimas com menor eficiência, tendo como consequência uma demora no processo de conversão da matéria orgânica em metabólitos; já na temperatura máxima, ocorre a desnaturação das proteínas (destruição do arranjo molecular) causando a morte celular (BARBOSA & TORRES, 1999).

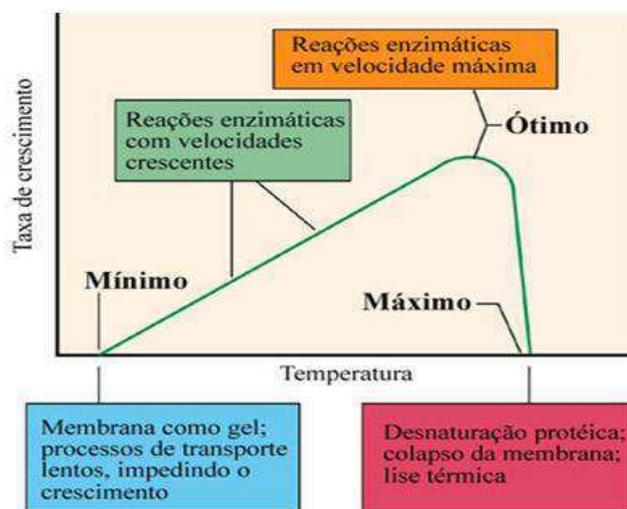


Figura 7: Temperaturas dos Microrganismos (KYAW, 2006).

2.8.2 Teor de Umidade

Os microrganismos dependem de um meio aquoso para atingir o seu pleno crescimento. Segundo Halvadakis *et al.* (1983) *apud* Monteiro 2003, a água fornece nutrientes requeridos pelos microrganismos, além de possibilitar sua rápida propagação no meio sólido. A água também possibilita o transporte de enzimas e de outros metabólitos importantes no processo de decomposição.

De acordo com Monteiro 2003, o teor de umidade pode variar de acordo com vários fatores como: a composição do lixo, as condições climáticas, as práticas de coletas e composição de RSU. Os componentes orgânicos dos RSU geralmente concentram a maior parcela de umidade. Alguns autores sugerem que o teor de umidade e o teor de matéria orgânica presentes no lixo fornecem os pré-requisitos necessários à fase inicial do crescimento bacteriano. Entretanto, grande quantidade de água infiltrada pode prejudicar a degradação. A faixa ótima de umidade para a degradação biológica deverá ser entre 20-40%, segundo Palmizano & Barlaz, (1996).

Valores de umidade fora desta faixa prejudicam a atividade metabólica dos diferentes grupos bacterianos, podendo, inclusive, desestabilizar a célula de lixo. Conforme Monteiro *et al.* (2001) outro fator importante é que, com a infiltração de água proveniente das chuvas, uma carga extra de oxigênio entraria nas células, aumentando o número de bactérias aeróbias ou anaeróbias facultativas, provocando uma desestabilização do meio, pois o ambiente interno passaria por variações técnicas, alterando as condições iniciais estabelecidas no interior da massa de lixo. Segundo Junqueira (2000) a entrada de uma carga extra de oxigênio dissolvida em água favorece o incremento das atividades de bactérias aeróbias ou anaeróbias facultativas, provocando um aumento da temperatura no interior da massa de lixo.

2.8.3 Potencial Hidrogeniônico (pH)

A atividade do íon hidrogênio na fase aquosa é um aspecto ambiental crítico que afeta o balanço entre as várias populações de microrganismos, como também a atividade microbiana. Em função do pH e sua capacidade de crescimento no meio, os microrganismos podem ser classificados em acidófilos, neutrófilos ou basófilos. Os primeiros apresentam crescimento ótimo em meio com pH baixo, enquanto o último a taxa de crescimento ótima ocorre em meios alcalinos. A maioria dos microrganismos são classificados como neutrófilos, com melhor crescimento na faixa de pH próximo a 7 (GADELHA, 2005).

O pH do meio anaeróbio está diretamente relacionado com as concentrações dos álcalis e dos ácidos do sistema. Bruscas alterações do pH afetam consideravelmente as atividades dos microrganismos metanogênicos (BIDONE e POVINELLI, 1999). Os organismos metanogênicos são os mais sensíveis ao pH e sua faixa ótima é de 6,6 a 7,4 (KAYAHANIAN *et al* 1991 *apud* GADELHA, 2005).

Grande parte das bactérias adaptam-se a um meio cujo pH ótimo é em torno da neutralidade, pois é o mais adequado para absorção de alimentos. Há, no entanto, uma faixa de pH em que os limites máximo e mínimo são estabelecidos, não restringindo a sobrevivência dos microrganismos a única condição de pH (BARBOSA & TORRES, 1999).

2.8.4 Demanda bioquímica de Oxigênio (DBO) e Demanda Química de Oxigênio (DQO)

A DBO pode ser definida como a quantidade de oxigênio requerida para a estabilização da matéria orgânica biologicamente degradável, através de processos bioquímicos. É uma indicação indireta do carbono orgânico biodegradável (FERREIRA, 2006). Como existem compostos orgânicos

resistentes à degradação biológica, os valores de DBO são sempre menores que os valores de DQO.

A DQO é a quantidade de oxigênio necessária para oxidar quimicamente todos os compostos sujeitos a esta reação (oxi-redução) presentes em uma determinada amostra. A DQO é diretamente proporcional a poluição de um corpo d'água, ou seja, rios altamente poluídos têm DQO elevada. Os valores são expressos em mg O₂/l (APHA, 1998).

A DQO representa um dos principais parâmetros para quantificação de contaminantes nos líquidos percolados, indicando a carga de matéria orgânica transportada e a quantidade de oxigênio necessária para sua estabilização (JUNQUEIRA *et al.*, 1999). De acordo com Monteiro (2003) uma análise mais específica mostra que a medida da demanda química de oxigênio serve como um importante parâmetro na avaliação do processo de decomposição, em particular, na compreensão dos efeitos da lixiviação microbiana.

A relação entre os dois índices, DBO/DQO, dá uma idéia da biodegradabilidade da matéria orgânica presente em uma massa de lixo, valores entre 0,5 e 0,7 (DBO / DQO) são comumente relatados para aterros recentes, enquanto que para aterros mais antigos os valores variam entre 0,2 e 0,3 (TCHOBANOGLUS *et al.*, 1993).

2.8.5 Teor de Sólidos Voláteis

Segundo Gomes (1989) *apud* Monteiro (2003) através da determinação do teor de sólidos voláteis determina-se a porcentagem de cinzas e a quantidade de matéria orgânica existente no resíduo sólido. Portanto, esse parâmetro pode ser um indicador de degradabilidade dos RSU ao longo do tempo. Um alto percentual de Sólidos Totais Voláteis (STV) indica a presença de muita matéria orgânica a ser degradada e baixos valores indicam que o resíduo já passou por um processo acentuado de degradação.

A determinação dos STV também é de grande importância para o acompanhamento das alterações de propriedades físicas, químicas e biológicas da massa de lixo depositada no aterro (KNOCHENMUS *et al.*, 1998).

De acordo com Monteiro (2003) os sólidos voláteis presentes na fração líquida resultante do processo de decomposição, representam a parcela facilmente degradável, ou seja, os primeiros resultados da atividade microbiana.

2.8.6 Teor de Metais Pesados

Os metais pesados estão presentes no lixo urbano em grande quantidade por estarem em componentes de pilhas, baterias, jornais, tintas, tecidos, enlatados, entre outros. Os principais agentes tóxicos verificados em processos anaeróbios, como é o caso de aterros sanitários, são cátions alcalinos e alcalinos terrosos, NH_4 , sulfetos, metais pesados, compostos orgânicos (ácidos voláteis), oxigênio, detergentes, antibióticos, cianetos e produtos químicos industriais dispostos no lixo (BIDONE e POVINELLI, 1999).

A Tabela 1 mostra as concentrações de metais capazes de inibir o processo de digestão anaeróbia da matéria orgânica.

Tabela 1: Concentrações inibitórias dos metais pesados na digestão anaeróbia.

Cátions	Concentração Inibitória (mg/L)
Fe^{++}	1 – 10
Zn^{++}	4 – 10
Cd^{++}	7 – 10
Cu^+	10 – 12
Cu^{++}	10 – 16

Fonte: Lima & Nunes (1994) *apud* Melo (2003)

Segundo Sisino (1995) a concentração de metais depende do tipo de lixo depositado no aterro e pode variar de acordo com o estágio de decomposição desse lixo, sendo maiores durante a fase de fermentação ácida, quando estes elementos estão mais solúveis e menores nas últimas fases de estabilização, quando o pH normalmente é mais alcalino.

A contaminação de metais na matéria orgânica pode afetar a biodegradação, pois, segundo Lawrence & McCarty (1965) os metais pesados são tóxicos à digestão anaeróbia, mesmo em baixas concentrações.

Durante a hidrólise e acidogênese há uma tendência de solubilização dos metais, no instante em que eles são liberados da fração sólida e incorporados ao chorume. Entretanto, durante a acetogênese há uma tendência de aumento da concentração de metais no meio em função da lixiviação microbiana e da acidez. Neste período os metais conferem mais periculosidade, se forem liberados para o meio ambiente. Na fase metanogênica ou maturação da célula de lixo, há um declínio brusco da concentração de metais em função da precipitação química decorrente da capacidade de tamponamento do meio. Neste momento inicia-se a formação de hidróxidos, fazendo com que os metais tornem-se menos solúveis e portanto, menos perigosos segundo Lima & Nunes (1994) *apud* Melo (2003).

2.8.7 Microbiologia

2.8.7.1 Microrganismos Indicadores de Poluição

Um indicador biológico ou bioindicador pode ser uma espécie ou grupos de microrganismos que permite a caracterização do estado de um ecossistema e de alterações naturais que estejam ocorrendo (ALCÂNTARA, 2007).

Abaixo são apresentados conceitos dos principais grupos de microrganismos comumente encontrados em resíduos sólidos urbanos, sendo assim importante conhecer algumas características desses grupos.

2.8.7.1.1 Grupo Coliforme

A classificação dos coliformes segundo SILVA (1997), apresenta o grupo de coliformes totais que inclui as bactérias na forma de bastonetes Gram-negativos, não esporogênicos, aeróbios ou aeróbios facultativos, capazes de fermentar a lactose com produção de gás, em 24 a 48 horas a 35°C. Apresenta-se cerca de 20 espécies, dentre as quais encontram-se tanto bactérias originárias do trato intestinal de humanos e outros animais de sangue quente.

Os coliformes termotolerantes são microrganismos pertencentes ao grupo dos coliformes totais e antes denominados coliformes fecais. De acordo com o Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, resolução 274 (2000), eles são caracterizados pela presença da enzima β -galactosidase e pela capacidade de fermentar lactose com produção de gás 24 horas, a temperatura 44-45°C. Além de presentes em fezes humanas e de animais, podem também ser encontrados em solos, plantas ou quaisquer efluentes, contendo matéria orgânica.

Segundo Alcântara (2007) a presença de coliformes estaria assim associada a uma grande variedade de agentes patogênicos como *Campylobacter*, *Salmonella*, *Shigella*, *Yersinia*, *Aeromonas*, *Pasteurella*, *Francisella*, *Leptospira*, *Vibrio*, protozoários e vírus, como o da hepatite. De acordo com USEPA (2006), a presença desses microrganismos pode não significar contaminação do meio, uma vez que podem ser predominantemente de origem ambiental e, assim, a correlação entre a presença de coliformes e de organismos patogênicos seria muito pobre. Por outro lado, têm-se relatado casos de enfermidades entéricas pelo consumo de água na qual não havia detectado coliformes (PAY-Y-MINO *et al*, 2003 *apud* ALCÂNTARA, 2007).

Apesar de considerados indicadores de poluição, esses microrganismos também podem representar um papel importante no processo de degradação da matéria orgânica presente nos RSU. De acordo com Frazier & Westhoff (1993), os microrganismos desse grupo têm capacidade de crescer em diversos substratos e utilizar os carboidratos e outros compostos orgânicos como fonte de energia, além

de elementos nitrogenados simples como fonte de nitrogênio. São ainda capazes de sintetizar a maioria das vitaminas de que necessitam.

2.8.7.2 Fungos

Os fungos são microrganismos heterotróficos e, em sua grande maioria, aeróbios obrigatórios. No entanto, certas leveduras se desenvolvem em ambientes com pouco ou até mesmo na ausência de oxigênio (UFSC, 2006).

Em compostos de RSU, têm sido encontrados fungos do gênero *Aspergillus*, inclusive da espécie *A. fumigatus*, que é responsável por infecções graves em seres humanos e animais. Como os fungos são microrganismos esporógenos, a sua presença ao longo do processo de degradação de RSU em aterros, sugere que eles possam permanecer por muito tempo, no ambiente do aterro, mesmo após a estabilização do material orgânico. A presença de bactérias e fungos patogênicos tem implicações relevantes em aterros de RSU (ALCÂNTARA, 2007).

A temperatura do crescimento dos fungos abrange uma larga faixa. Várias espécies podem crescer em ambientes de elevada temperatura (TORTORA *et al.*, 2000). Os fungos de importância média, em geral apresentam temperatura ótima de crescimento entre 20 e 30°C. A espécie *A. fumigatus*, encontrada freqüentemente em RSU e cujos esporos são causadores de doenças respiratórias, podem crescer em temperaturas abaixo de 20°C e até aproximadamente 50°C (EMMONS *et al.*, 1979 citado por GERBA, 1996).

Os fungos atuam na decomposição dos principais constituintes dos vegetais, especialmente da celulose, lignina e pectina (PELCZAR *et al.*, 1996). A adição de enzimas celulolíticas e hidrolíticas de fungos antes da digestão anaeróbia de resíduos sólidos, aumenta a eficiência do processo, considerando-se que fungos lignolíticos aumentam a biodegradabilidade da massa de lixo (SRINIVASAN *et al.*, 1997).

Os fungos produzem enzimas que hidrolisam o substrato tornando-o assimilável através de mecanismos de transporte ativo e passivo. Alguns substratos podem induzir a formação de enzimas degradativas. Existem fungos que hidrolisam substâncias orgânicas, como quitina, osso, couro, inclusive materiais plásticos.

2.8.8 Fitotoxicidade

A identificação dos contaminantes responsáveis pela toxidez é extremamente difícil, devido ao número restrito de componentes químicos detectados por análises de rotina, a complexidade dos resíduos e a incerteza de sua biodisponibilidade. Portanto, a avaliação de identificação da toxidez é uma ferramenta para detectar e identificar os agentes tóxicos (LINS, 2005).

A utilização dos rejeitos de um aterro na agricultura, por exemplo, com altas concentrações de sais e metais pesados, pode causar um detrimento na germinação de sementes, na planta jovem, na maturação, no crescimento da raiz e nos ramos (TAM & TIQUIA, 1994).

Segundo Melo *et al.* (2002), os ensaios de fitotoxicidade e determinação de metais em aterros de RSU são realizados para avaliar o nível de toxicidade nas diferentes profundidades e seus efeitos na biota microbiana. Além do mais, o teste de fitotoxicidade é um critério que pode ser utilizado para avaliar os níveis de toxidez antes de o resíduo ser reutilizado para diversos fins e, assim, evitar acidentes ambientais.

De acordo com Wang & Keturi (1990), a germinação de plantas e o comprimento da raiz tem sido teste bastante usado por ser uma técnica simples, rápida, segura e reproduzível para avaliar os danos causados pelas combinações tóxicas presentes nesses resíduos.

2.9 Estatística

A análise estatística se utiliza das teorias probabilísticas para explicar a frequência da ocorrência de eventos. Tem por objetivo obter, organizar e analisar dados estatísticos, a fim de descrever e explicá-los, além de determinar possíveis correlações. Em outras palavras, a estatística procura modelar a aleatoriedade e a incerteza de forma a estimar ou possibilitar a previsão de fenômenos futuros, conforme o caso. A estatística é uma ciência que se dedica à coleta, análise e interpretação de dados. Preocupa-se com os métodos de recolha, organização, resumo, apresentação e interpretação dos dados, assim como tirar conclusões sobre as características das fontes donde estes foram retirados, para melhor compreender as situações (WIKIPÉDIA, 2009).

A estatística, que pode ser dividida em três partes: descritiva, probabilística e inferencial (COSTA NETO, 1978). O uso da estatística descritiva dá a idéia do comportamento global, da forma de distribuição assumida pelas variáveis experimentais. A probabilidade ajusta os valores experimentais a modelos probabilísticos conhecidos e a inferência leva o pesquisador à veracidade desse comportamento com um nível de confiança desejado, no geral admite-se 95%. Outro estudo estatístico que será realizado envolve a análise multivariada em componentes principais para a verificação do grau de influência de cada variável no estudo do comportamento dos resíduos dispostos em células experimentais e em escala real.

2.9.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva tem como objetivo básico sintetizar uma série de valores de mesma natureza, permitindo dessa forma que se tenha uma visão global da variação desses valores, utilizando-se gráficos preliminares por meio do histograma de frequência relativa e polígono de frequência. Podem-se também

eliminar valores extremos nos dados amostrais pelo uso do intervalo inter-quartil, já que provavelmente irão conter alguns erros associados em seus valores numéricos que serão de origem experimental ou de observação.

Como as amostras experimentais apresentam erros, a estatística descritiva auxilia nas observações preliminares quanto a medidas de tendência central, de dispersão e medidas de forma. Estas análises fornecem uma maior confiabilidade aos dados coletados e indicam uma tendência inicial do comportamento dos parâmetros observados.

2.9.2 Análise de componentes principais

A Análise de Componentes Principais (ACP) é um dos métodos estatísticos mais usados quando se pretendem analisar dados multivariados. Ela permite transformar um conjunto de variáveis originais, correlacionadas, em um novo conjunto de eixos transladados ortogonais. A ACP é verificada se existe um pequeno número das primeiras componentes principais que seja responsável por explicar uma proporção elevada da variação total associada ao conjunto original.

Para a aplicação da técnica de componentes principais (ACP) faz-se necessário à construção da matriz de dados brutos que pode ser disposta em n medidas de diferentes propriedades (variáveis) executadas sobre m amostras (objetos), de modo que a matriz de dados d é formada por $m \times n$ (m linhas correspondentes às amostras e n colunas correspondentes às variáveis).

Uma decisão a ser tomada diz respeito ao número de componentes principais que deve ser retido na análise. Se esse número é muito pequeno pode haver uma redução exagerada da dimensionalidade e muita informação pode ser perdida. Se o número for grande, pode-se não atender aos objetivos de redução. Na verdade, essa redução depende das correlações e das variâncias das variáveis originais (PAIVA, 2009).

De fato, é possível demonstrar que o método de ACP é uma técnica ótima de redução linear de dimensão, relativa ao erro quadrático médio. Tal redução é vantajosa para compressão, visualização dos dados, redução do cálculo necessário em fases de processamento posteriores.

2.9.3 Análise de variância (ANOVA)

A análise de variância trata-se de um estudo estatístico, que através de testes de igualdade de médias, verifica-se se fatores produzem mudanças sistemáticas em alguma variável de interesse.

Aplica-se a análise de variância para a comparação simultânea entre médias de diversas amostras ou para estimar a variabilidade associada a diferentes fontes de variação. Essa análise baseia-se no fato de que a variância de uma soma de variáveis aleatórias, não correlacionadas entre si, é igual à soma das variâncias dessas mesmas variáveis (LANDIM, 2003 *apud* PAIVA, 2009).

3. METODOLOGIA

3.1 Introdução

A pesquisa foi desenvolvida a partir do projeto, construção e do monitoramento de uma célula experimental (lisímetro/biorreator), simulando aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos (Figura 8).

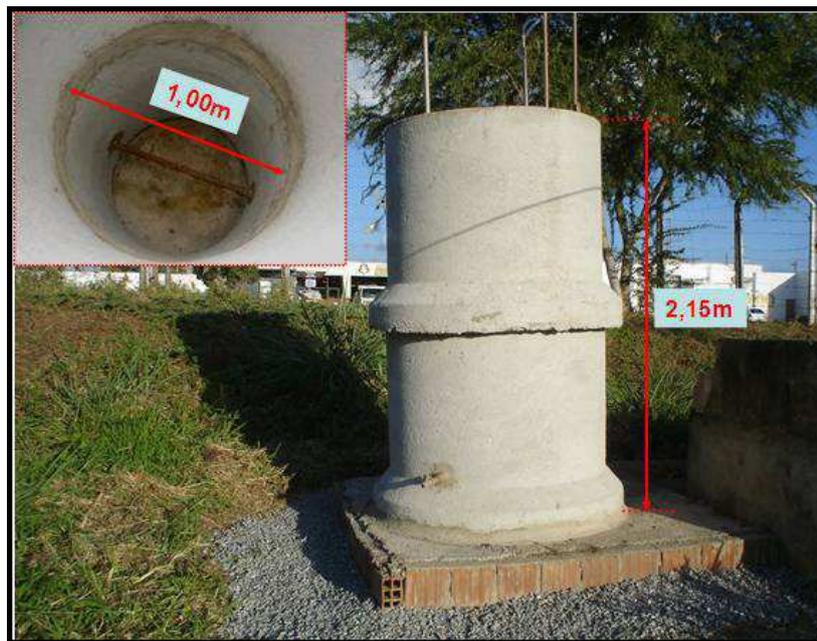


Figura 8: Célula experimental (lisímetro/biorreator)

As coletas foram realizadas na EXTRABES (Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários) que é um núcleo de pesquisa da Universidade Federal de Campina Grande e Universidade Estadual da Paraíba localizado em terreno pertencente à Companhia de Água e Esgoto do Estado da Paraíba – CAGEPA, onde foi construído o lisímetro, com um período experimental de aproximadamente 12 meses.

A metodologia desenvolvida para dissertação será demonstrado no fluxograma da Figura 9.

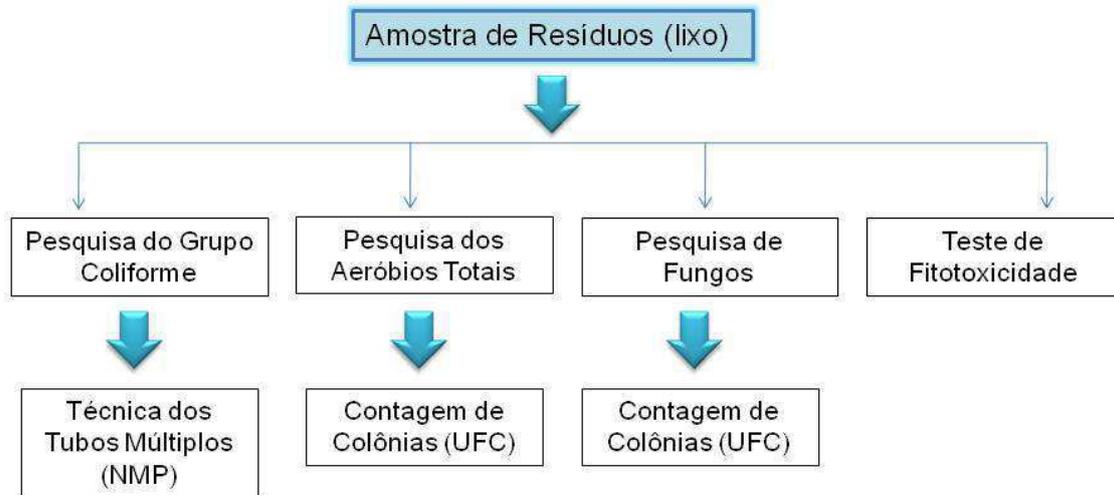


Figura 9: Fluxograma do procedimento experimental utilizado.

3.2 Projeto e Construção do Lisímetro

O lisímetro foi projetado para obter parâmetros que poderão servir de base para projetos, dimensionamento, construção e monitoramento de aterros sanitários, como também visando avaliar o processo biodegradativo dos resíduos depositados nesta célula experimental.

O lisímetro foi construído a partir da superposição de duas manilhas de concreto armado, com uma altura total de 2,15m e diâmetro interno de 1,00m, com volume aproximado de $1,7\text{m}^3$, apoiado sobre uma base de alvenaria e fixado a ela com auxílio de argamassa. A sua estrutura teve o formato de uma seção transversal circular visando facilitar a distribuição e a compactação dos resíduos no seu interior, uniformizando a distribuição das pressões laterais na parede interna do lisímetro, evitando caminhos preferenciais de percolação do lixiviado e reduzindo a área de superfície lateral interna diminuindo o contato entre o lixo e a parede interna (Figura 10).

(Figura 11 -c). A camada foi executada por meio de compactação em estratos de, aproximadamente, 0,10m de espessura com auxílio de um soquete manual e uma enxada.



Figura 11: Impermeabilização, drenagem e camada de cobertura do lisímetro.

3.3 Instrumentações do Lisímetro

A instrumentação instalada no lisímetro foi projetada na literatura técnica e na instrumentação utilizada para monitoramento de aterros sanitários, sendo feitas algumas adaptações, de acordo com Leite (2008), às características do lisímetro para melhor obtenção dos dados.

3.3.1 Termopares

Consiste em um par de metais de cobre e cromo unidos em uma ponta, que são sensíveis à temperatura, gerando desta forma uma corrente elétrica proporcional à temperatura. Esta corrente é medida na superfície por um termômetro elétrico, sua operação básica consiste na calibração da corrente emitida pelo termopar em função da temperatura da junção, procedendo-se desta maneira uma calibração entre temperatura e corrente elétrica, desta forma a temperatura é obtida de forma indireta. . O monitoramento das temperaturas no interior do lisímetro foi feito a partir de 3 termopares, de profundidades 1,45m, 0,75m e 0,05m apresentadas na Figura 10, com conectores do tipo K, numerados de 1 a 3, e o auxílio de um termômetro (Figura 12).



Figura 12: Termopar com conector tipo K e termômetro.

3.3.2 Medidor de Nível de Água

Para o monitoramento do nível de lixiviado, foi usado um piezômetro, que consiste em um tubo de PVC de 25mm com furos nas paredes do tubo. A variação do nível de lixiviado foi medida com o auxílio de uma haste de metal. O princípio básico de seu funcionamento é o dos vasos comunicantes, ou seja,

independente do formato e dimensão do recipiente o líquido tende a atingir a mesma cota. O piezômetro também foi envolvido com uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos (Figura 13).



Figura 13: Instalação do piezômetro no lisímetro.

3.3.3 Placas de Recalques

O monitoramento dos recalques foi realizado com o uso de 4 placas de recalques circulares de diâmetro aproximados de 150mm de diâmetro e 10mm de espessura. As placas foram confeccionadas em aço e revestidas com uma película anti-corrosiva para evitar a oxidação e contaminação dos resíduos. Estes medidores foram instalados na superfície e em profundidade. As placas de recalque superficiais foram instaladas sobre a massa de lixo após a colocação de uma camada de solo para regularização.

Foi instalada uma placa em profundidade logo acima da camada de solo na interface camada de base / massa de resíduo e outra placa distante 0,75m da face superior da camada de base posicionada durante o enchimento da célula experimental. As placas foram protegidas por tubos PVC de 20mm para evitar o atrito lateral (Figura 14).

Essas placas de recalque têm como finalidade verificar os deslocamentos verticais descendentes da superfície de um aterro, provocadas por cargas externas, peso próprio e principalmente ao processo de degradação biológica dos resíduos depositados.



Figura 14: Placas para medição de recalque.

3.3.4 Drenagem de Gases

O dreno de gás, instalado no centro geométrico do Lisímetro, consistiu de um tubo de PVC perfurado de 25mm de diâmetro envolvido por uma tela de nylon para evitar a obstrução dos furos (Figura 15).

A ponta superior da tubulação de gás foi adaptada a uma mangueira, para facilitar a medição dos gases com um sistema adaptado com uma seringa, e a extremidade inferior da tubulação era aberta e foi posicionada acima da camada de drenagem de líquidos.



Figura 15: Sistema de drenagem de gás.

3.4 Caracterizações dos Resíduos e Preenchimento do Lisímetro

3.4.1 Preparação da Amostra

Visando obter amostras representativas dos RSU da cidade de Campina Grande verificou-se a necessidade de se estabelecer um plano de amostragem. Este plano baseou-se nas informações obtidas junto a Diretoria de Limpeza Urbana (DLU) como também na literatura técnica (LEITE, 2008).

Para a realização da coleta e amostragem utilizou-se o procedimento recomendado pela norma NBR 10007 (ABNT, 2004c) - Amostragem de Resíduos. A coleta das amostras foi realizada utilizando-se um caminhão compactador com capacidade aproximada de 9 toneladas. Os RSU destinados ao enchimento do lisímetro, foram coletados de 3 bairros de classes sociais distintas, com rotas de coletas definidas pelo departamento de limpeza urbana do município de Campina Grande. Os bairros utilizados para a coleta dos RSU foram: Mirante (classe alta), Catolé (classe média) e Conjunto Argemiro Figueiredo situado no bairro Sandra Cavalcanti (classe baixa) (Figura 16).

A coleta foi realizada no período noturno conforme roteiro de coleta diária. Terminada a coleta, o material foi encaminhado para a área de amostragem, localizada na EXTRABES para triagem do material coletado na manhã seguinte.

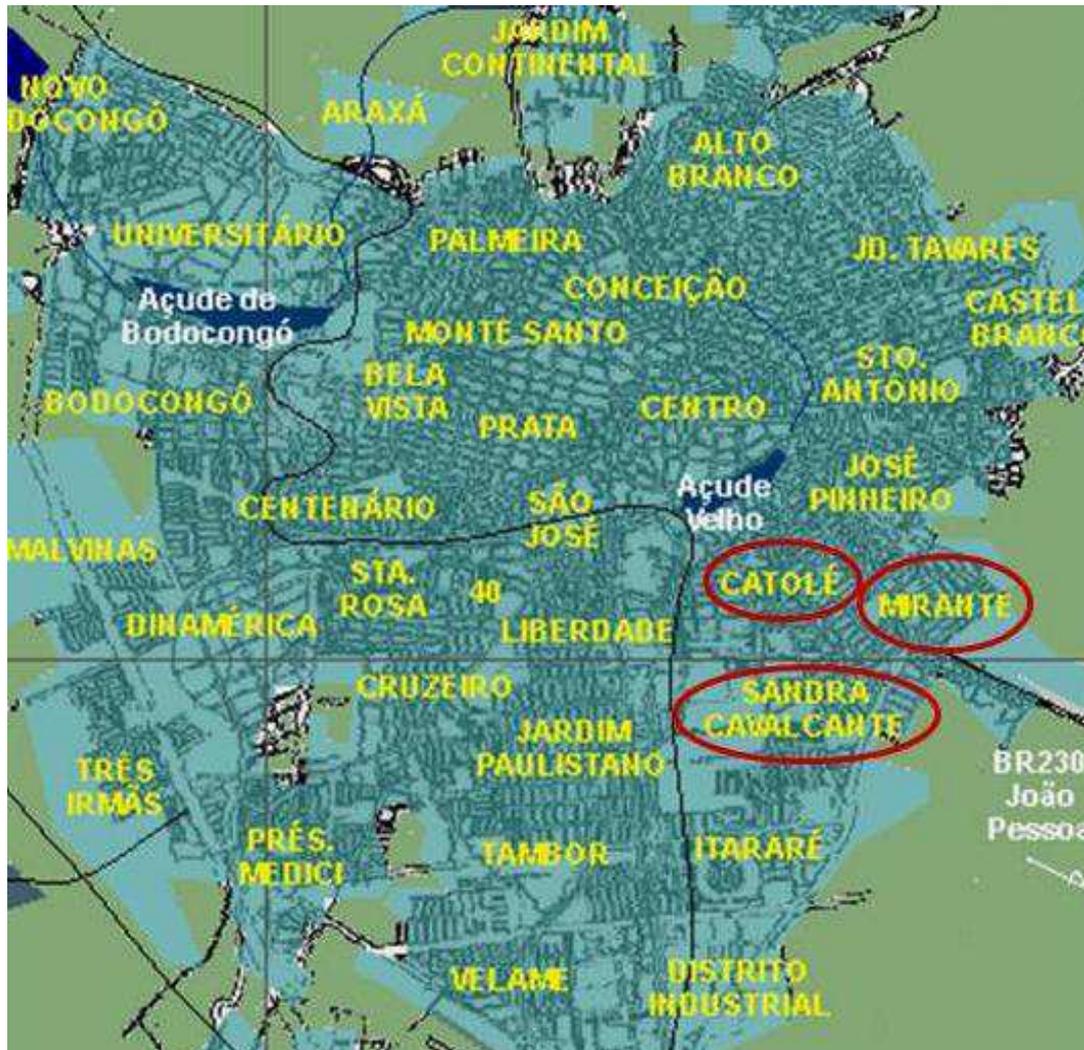


Figura 16: Mapa dos bairros de Campina Grande.

3.4.2 Caracterização da amostra

Para a caracterização dos resíduos, foram realizadas as seguintes etapas (Figura 17):

1. Descarregamento dos resíduos do caminhão compactador;
2. Homogeneização dos resíduos com auxílio de uma enchedeira;
3. A amostra foi quarteada, utilizando-se aleatoriamente apenas duas partes do quadrante, formando assim uma única pilha resultante.

Após o processo de homogeneização e quarteamento dos RSU provenientes da rota selecionada para pesquisa, foi obtido a amostra final com aproximadamente 4,5 toneladas de resíduos, de onde foram retiradas as parcelas para preenchimento do lisímetro e caracterização física, química e microbiológica dos resíduos.



Figura 17: Descarregamento (1), homogeneização do material (2) e divisão das pilhas(3).

3.5 Preenchimento do Lisímetro

De acordo com a Figura 18, as etapas do preenchimento do lisímetro, de acordo com Leite (2008) constaram de:

1. O preenchimento do lisímetro foi iniciado com a colocação da camada de solo impermeável de base e logo depois usou-se uma camada de brita para auxiliar a drenagem de líquidos lixiviados;
2. Logo após, o lisímetro foi preenchido com o RSU da pilha resultante e instalada a instrumentação;
3. Em seguida foi realizada a compactação manual dos resíduos em camadas, através da aplicação de golpes de soquete, distribuídos uniformemente em toda a área superficial. Este processo foi repetido sucessivas vezes, até o preenchimento total do lisímetro. A colocação da instrumentação, em cotas prestabelecidas, foi realizada a medida que os RSU foi compactado em camadas;
4. Após o preenchimento do lisímetro com os resíduos até a cota pré-estabelecida, foi feita uma regularização do topo da massa de resíduos, com uma fina camada de solo, onde foram apoiadas duas placas de recalque. Após a colocação das placas, foi executada a camada de cobertura final.



Figura 18: Etapas do preenchimento do Lisímetro.

3.6 Coleta e Preparação das amostras de sólidos (lixo)

A coleta de amostras sólidas inicialmente foi realizada a cada 15 dias, após 3 meses notou-se a presença do solo da camada de cobertura no orifício superior de coleta, devido ao recalque ocorrido durante este período, provavelmente pela quantidade de material coletado. Para solucionar o problema foi aberto outro orifício superior paralelo ao inicial e a coleta passou a ser realizada a cada 20 dias. Após mais 2 meses notou-se novamente a presença de solo, então foram feitas 2 aberturas, como novos pontos de coleta, no outro lado do lisímetro e a coleta passou a ser realizada mensalmente.

Para coleta das amostras sólidas, foi utilizado um amostrador de cravação manual, onde foram retiradas aproximadamente 500g de sólidos, de cada abertura, sendo uma amostra superior e outra inferior (Figura 19).



Figura 19: Obtenção das amostras do Lisímetro.

As amostras foram picotadas com tesoura em tamanho de 3mm a 5mm, aproximadamente, e logo após eram armazenadas conforme cada análise a ser realizada (físico-química e microbiológicas).

3.7 Análises de Parâmetros Microbiológicos

3.7.1 Diluições da Amostra

A amostra destinada as análises microbiológicas (10g) foi diluída em um béquer estéril de capacidade de 200 ml, dotado de 90 ml de água destilada; a amostra foi agitada manualmente com um auxílio de um bastão, durante um período de aproximadamente 15 minutos; a porção líquida da solução foi separada da sólida através de uma peneira plástica; e diluída em tubos de ensaio sucessivamente, obtendo-se as diluições de 10^{-2} até 10^{-6} .

3.7.2 Preparo dos Meios de Cultura

Os meios de cultura foram utilizados de acordo com recomendações do fabricante.

Quantificação de coliformes totais:

Ensaio presuntivo: Caldo Lactosado (26g), Púrpura de Bromocresol (0,09g) e água destilada (1000mL).

Ensaio confirmativo: Caldo Lactosado Verde Brilhante e Bile a 2% (40g) e água destilada (1000mL).

Quantificação de coliformes termotolerantes:

Meio *E. Coli* (37g) e água destilada (1000mL).

Quantificação de fungos:

Meio Ágar Sabouraud-Dextrose (65g), Clorofenicol (0,5g) e água destilada (1000mL).

Quantificação de aeróbios totais:

Meio Plate Cout Ágar (23,5g) e água destilada (1000mL).

3.7.3 Quantificação de Coliformes

A quantificação de coliformes foi realizada através da Técnica de Tubos Múltiplos, segundo a metodologia do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1998).

3.7.3.1 Técnica dos Tubos Múltiplos

A determinação do Número Mais Provável (NMP) de coliformes em uma amostra foi efetuada a partir de aplicação da técnica de tubos múltiplos. Esta técnica é baseada no princípio de que as bactérias presentes em uma amostra podem ser separadas por agitação, resultando em uma suspensão de células bacterianas, uniformemente distribuídas na amostra. Consiste na inoculação de volumes decrescentes da amostra em meio de cultura adequado ao crescimento dos microrganismos pesquisados, sendo cada volume inoculado em uma série de tubos. Através de sucessivas diluições da amostra, são obtidos inóculos, cuja semeadura fornece resultados negativos em pelo menos um tubo da série e a combinação de resultados positivos e negativos permite a obtenção de uma estimativa da densidade das bactérias pesquisadas, através da aplicação de cálculos de probabilidade (com 95% de confiança), através da Tabela de Hoskins (Anexo), a qual utiliza uma estimativa da densidade original das bactérias pesquisadas expressas por NMP por 100mL.

3.7.3.1.1 Ensaio Presuntivo para Coliformes Totais

Para este ensaio foi realizado uma série de três tubos contendo 10mL, 1mL e 0,1mL da amostra em caldo lactosado com púrpura de bromocresol em dupla concentração, para tubos contendo 10mL da amostra, e em concentração simples, para tubos contendo 1mL e 0,1mL da respectiva

amostra (Figura 20). Após as diluições e inoculações, os tubos foram incubados a uma temperatura de $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$, durante 48 horas, para observar o crescimento de microrganismos fermentadores de lactose através da produção de gás (Figura 21).

A acidificação, com produção de gás, observada pela turvação do meio, decorre da fermentação da lactose contida no meio de cultura empregado neste ensaio, é prova presuntiva para a presença de bactérias do grupo coliforme (MELO, 2003).

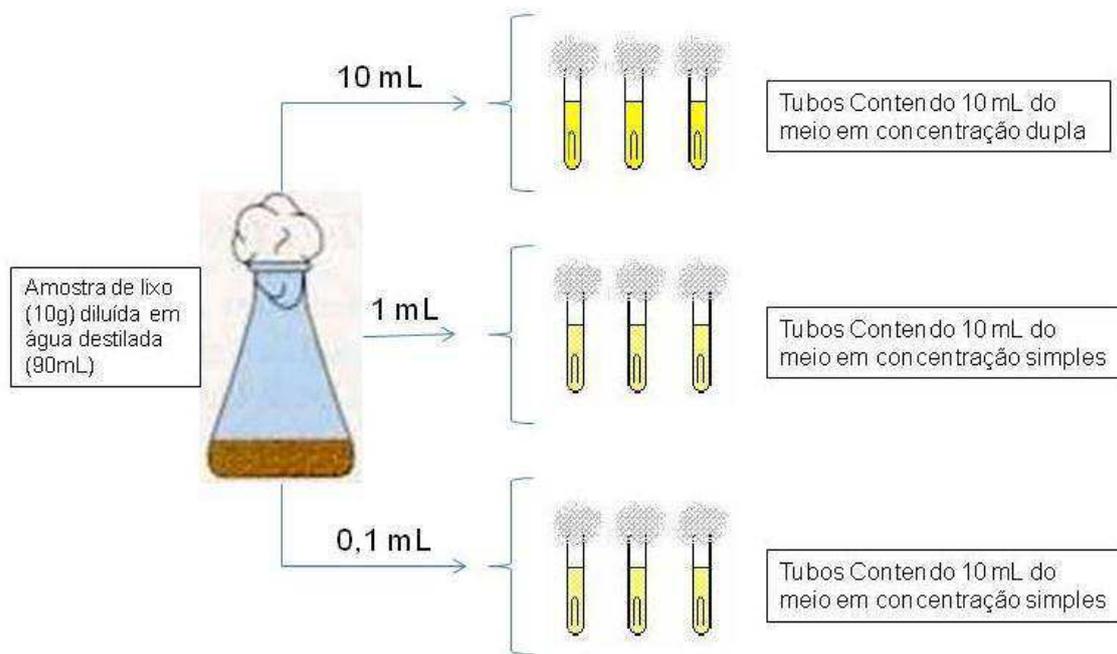


Figura 20: Esquema da quantificação de coliformes por tubos múltiplos.

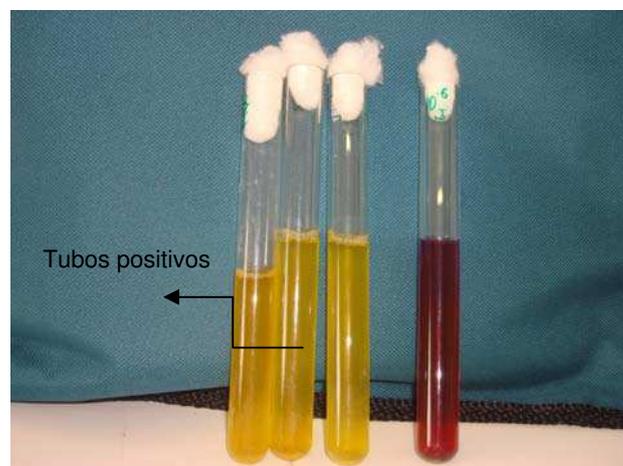


Figura 21: Tubos de ensaio presuntivo para coliformes totais.

3.7.3.1.2 Ensaio Confirmativo para Coliformes Totais

Consiste na transferência de cultura de todos os tubos positivos de caldo lactosado incubados durante 48 horas a $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$ para tubos contendo caldo lactosado verde brilhante e bile a 2%, que são incubados durante 48 horas a uma temperatura de $35\pm 0,5^{\circ}\text{C}$.

3.7.3.1.3 Ensaio Confirmativo para Coliformes Termotolerantes

As amostras positivas no ensaio presuntivo de coliformes totais foram inoculadas, com auxílio de uma alça de platina previamente flambada, em tubos de ensaio contendo meio de cultura próprio para coliformes termotolerantes (Meio *E. coli*). Em seguida os tubos já inoculados foram encaminhados para estufa a 44°C , durante 24 horas. A liberação de gás determina a presença de coliformes termotolerantes na amostra (FUNASA, 2006).

3.7.4 Aeróbios Totais

Para determinar a presença de microrganismos aeróbios, usou-se tubos de ensaio contendo 9 ml de solução tampão fosfato, os quais foram autoclavados a 121°C durante 15 minutos.

A amostra com 10 gramas de RSU foi adicionado em 90mL de tampão fosfato e diluídas até atingir 10^{-5} , selecionaram as mais significativas (10^{-3} a 10^{-5}). De cada tubo, retirou-se 0,1mL da amostra e com auxílio de uma alça de platina adaptada e espalhou-se esta amostra em toda a placa de Petri contendo meio Plate Count Ágar, realizando três repetições para cada diluição selecionada (Figura 22).

Após esses procedimentos, as placas foram encaminhadas à estufa a 37°C por 48 horas e em seguida realizou-se a contagem das colônias formadas sobre a superfície da placa e realizado o cálculo das unidades formadoras de colônia (UFC) (Figura 23). A grande vantagem desse método é que a população bacteriana é quantitativa.

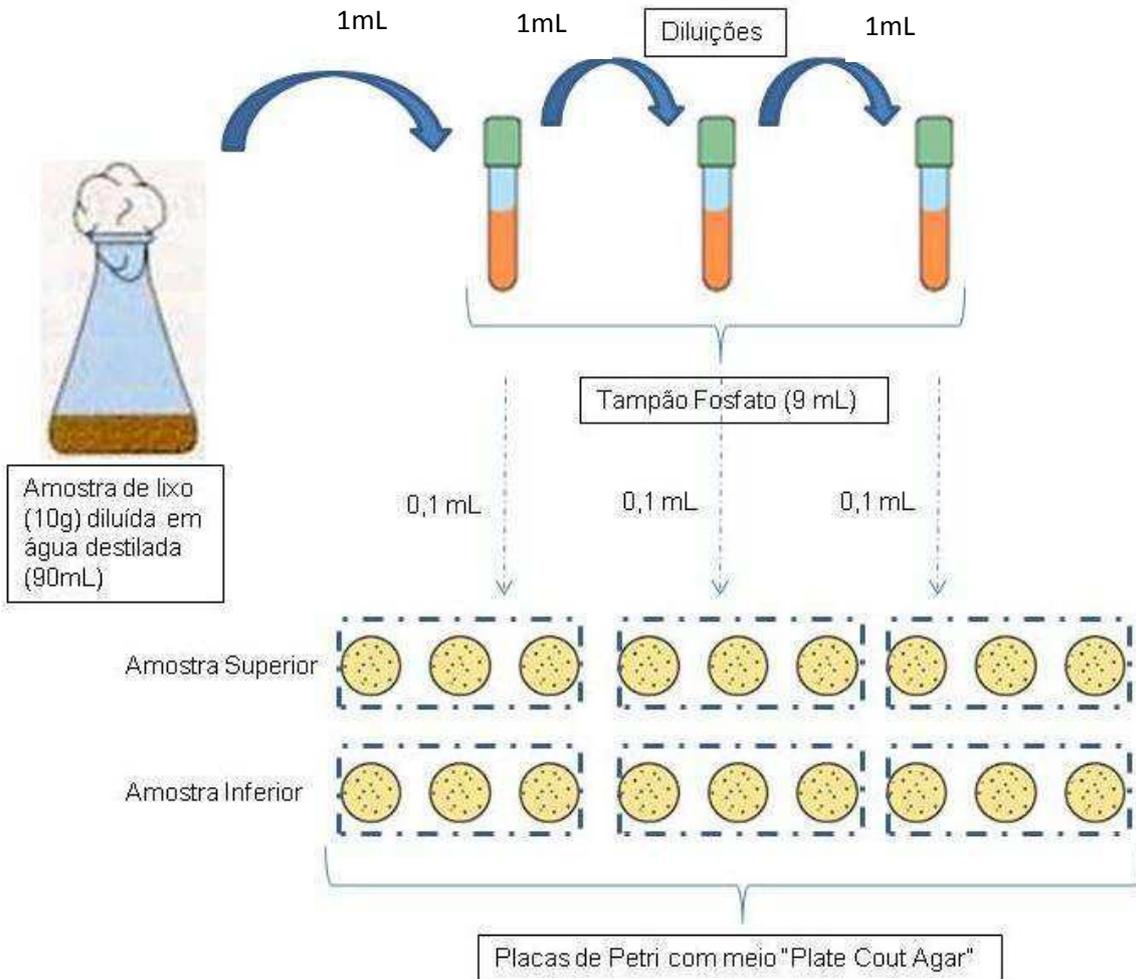


Figura 22: Desenho esquemático do procedimento do ensaio de Aeróbios Totais.

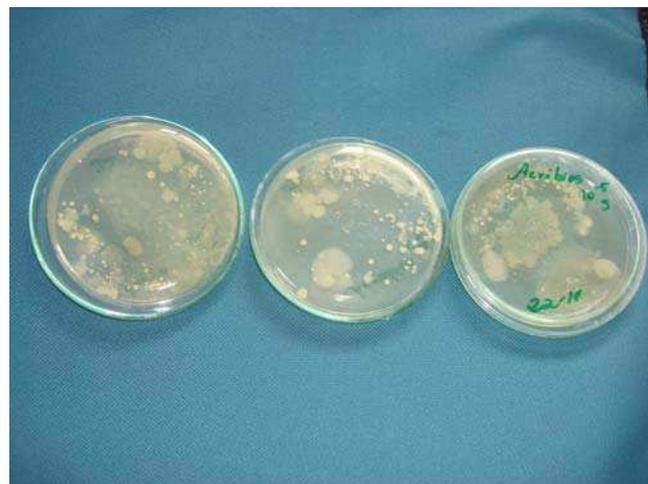


Figura 23: Placas de Ensaio de Aeróbios Totais.

3.7.5 Fungos

Segundo Trabulsi (2005) os fungos se desenvolvem em meios especiais de cultivos, como o meio ágar-sabouraud, formando colônias leveduriformes, que em geral apresentam aspecto pastoso ou cremoso e, colônias filamentosas que são caracterizadas por aspectos aveludados, algodonosas, pulverulentas, com os mais variados tipos de pigmentação (Figura 24).

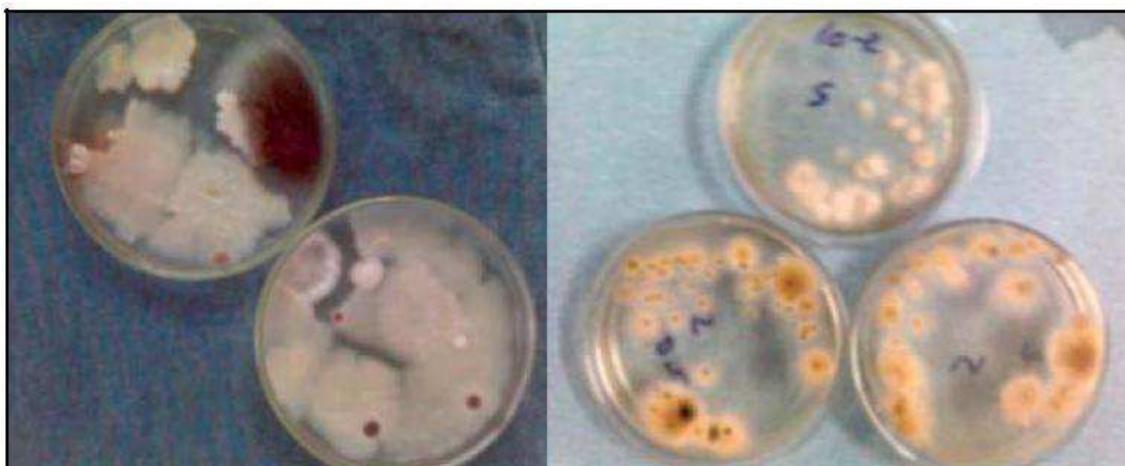


Figura 24: Colônia de fungos.

A amostra de resíduo foi submetida a diluições de 10^{-1} a 10^{-5} e posteriormente selecionada as diluições que pudessem prover a contagem de fungos. As amostras foram semeadas com 0,1 mL diretamente sobre placas de petri contendo meio ágar-sabouraud com clorofenicol e com auxílio de uma alça de platina adaptada, espalha-se a amostra na superfície da placa. Para evitar o crescimento bacteriano na placa semeada foi adicionado o antibiótico cloranfenicol, permitindo deste modo que ocorra apenas crescimento de fungos.

Em seguida a amostra foi incubada a 35°C , durante um período de cinco a 7 dias, onde, passado esse período, foi realizada a contagem e cálculo das UFC fúngicas (PELCZAR JR, *et al.*, 1997).

3.8 Testes de fitotoxicidade

Os procedimentos dos ensaios de fitotoxicidade foram baseados e adaptados conforme Tiquia *et al.*, (1996). Os testes de fitotoxicidade objetivam verificar o grau de toxicidade em profundidade e ao longo do tempo, avaliar os riscos ao meio ambiente e a saúde pública, caso haja uma possível abertura da célula de resíduos e acompanhar a evolução do processo de biodegradação dos resíduos em profundidade (MONTEIRO, 2003).

O ensaio consistiu em semear duas diferentes sementes de plantas com os resíduos coletados no lisímetro das porções inferiores e superiores. As sementes de tomate (*Lycopersicon Lycopersicum*) e repolho (*Brassica Oleraceae*), foram usadas em placas de petri contendo papel de filtro, sendo necessária fazer a desinfecção através da lavagem das sementes por duas a três vezes em 1000ml de água destilada com 1ml de água sanitária

Para o processo de diluição, consistiu na utilização de 10g de resíduos sólidos foram diluídos em 90mL de água destilada esterilizada e realizada as diluições até 10^{-6} . Em seguida transferiu-se as diluições 10^{-4} a 10^{-6} para as placas contendo cada uma delas 20 sementes de cada vegetal. Cada diluição foi feita em triplicata. As placas foram encaminhadas para uma estufa a uma temperatura de 20 a 22°C durante cinco dias. Ao final desse período as sementes germinadas foram contadas, bem como medido o comprimento das raízes. Realizou-se também uma amostra controle onde as sementes foram colocadas em uma placa contendo um papel de filtro e água destilada esterilizada (Figura 25).

Os parâmetros a serem analisados nos testes de fitotoxicidade foram: Germinação Relativa das Sementes – GRS (Equação 1) e o Crescimento Relativo da Raiz – CRR (Equação 2).

Germinação Relativa da Semente (GRS):

$$GRS(\%) = \frac{\text{número de sementes germinadas}}{\text{número de sementes germinadas no controle}} \times 100 \quad (\text{Eq. 1})$$

Crescimento Relativo da Raiz (CRR):

$$GRR(\%) = \frac{\text{média do comprimento da raiz}}{\text{média do comprimento da raiz do controle} \times \sqrt{\text{crescimento da raiz do controle}}} \times 100 \text{ (Eq. 2)}$$



Figura 25: Ensaio de Fitotoxicidade.

3.9 Análise dos Parâmetros Físicos, Químicos e Físico-Químicos

Para entender o processo biodegradativo, foram realizadas as análises dos parâmetros físicos, químicos e físico-químicos, onde o Grupo de Geotecnia Ambiental (GGA) da Unidade Acadêmica de Engenharia Civil da UFCG, contribuiu para este desenvolvimento.

As análises de temperatura foram medidas *in situ*, o teor de umidade para amostras sólidas e os sólidos voláteis foram de acordo com WHO (1979), os metais através de Tedesco *et al.* (1995), os testes de fitotoxicidade por Tíquia *et al.* (1996) e os demais parâmetros foram realizadas baseadas no Standard Methods for Examination of Water and Waster Water, 1998.

3.10 Análise Estatística

No presente trabalho foi utilizado, por meio da estatística descritiva, a verificação do comportamento das variáveis analisadas, com a utilização do software STATISTIC FOR WINDOWS 6.0 e logo depois verificou-se se os valores estudados seguem uma distribuição normal dos dados obtidos no experimento, usando o teste de Kolmogorov-Smirnov.

A relação entre os resultados foi testada por meio da Análise em Componentes Principais (ACP), onde verificou através da matriz de correlação e do gráfico da ACP se estas variáveis possuem comportamento semelhante entre si, ou seja, que ao serem influenciadas pelo mesmo fator se comportaram devido esta influencia de modo parecido; com isso são formados grupos semelhantes estatisticamente.

Para avaliar as correlações biodegradativas obtidas durante o período de monitoramento foram considerados, para o estudo da ACP, os parâmetros: umidade, temperatura, pH, sólidos voláteis, recalque, Metais (Cobre, Ferro, Manganês e Zinco), microrganismos (aeróbios e fungos) e testes de fitotoxicidade.

Nos testes de fitotoxicidade foram realizados análises de variância (ANOVA), para comparar os valores médios de cada conjunto de dados e também foi feito o teste T para variáveis iguais, para melhor visualização das diferenças significativas entre as médias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados do monitoramento da célula experimental (Lisímetro), referente ao intervalo de tempo de outubro de 2007 a outubro de 2008.

Segundo Monteiro (2003) a análise dos RSU de um lisímetro, através de ensaios físicos, físico-químicos, químicos e microbiológicos, permite acompanhar a evolução dos processos que ocorrem no interior da massa de lixo, tendo como indicativo a atividade microbiana, que é responsável pela degradação biológica da matéria orgânica.

Na cidade de Campina Grande – PB a composição gravimétrica apresenta a maior parte dos resíduos sólidos urbanos constituída de matéria orgânica putrescível, atingindo um valor de aproximadamente 70%, em seguida a fração de plástico com 11,44% e os têxteis sanitários com 5,68%. Segundo Leite et al., (2008) o valor elevado dos têxteis sanitários justifica-se pela intensa presença de fraudas descartáveis. Outra fração representativa compreende os papéis somados aos papelões, com percentual de 6,23%. A presença do volume de plásticos e papéis/papelões foi elevada, contudo, devido as suas baixas massas específicas eles não apresentam maior representatividade na composição gravimétrica. Em estudos com composição volumétrica observa-se que o teor de plástico é muito superior quando comparado com a composição gravimétrica, pois é um material de leve massa molecular, mas em grande quantidade apresenta volumes excessivos.

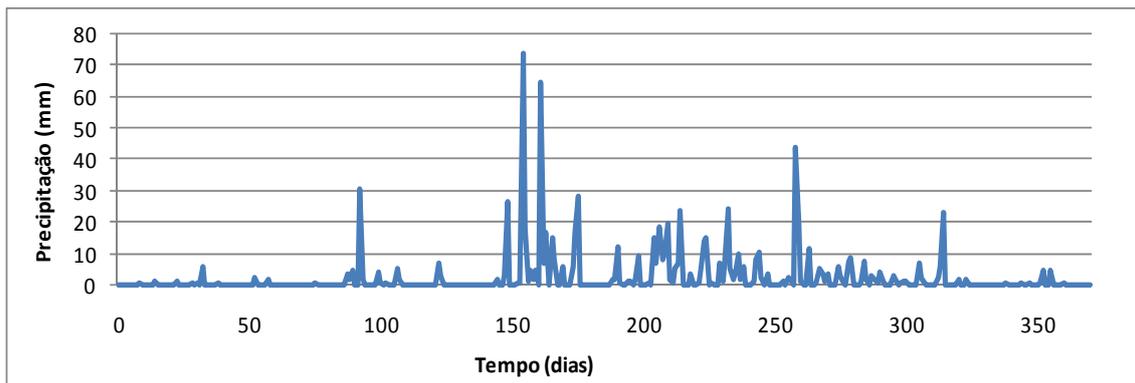
4.1 Condições Climáticas

O clima da cidade de Campina Grande – PB (7°13' 11" S; 35°52' 3" W) é do tipo equatorial semi-árido, com temperaturas médias bastante amenas, apesar de sua baixa latitude, sofrendo relativamente pequenas variações no decorrer do ano, com máximas de 27°C e mínimas de 16°C.

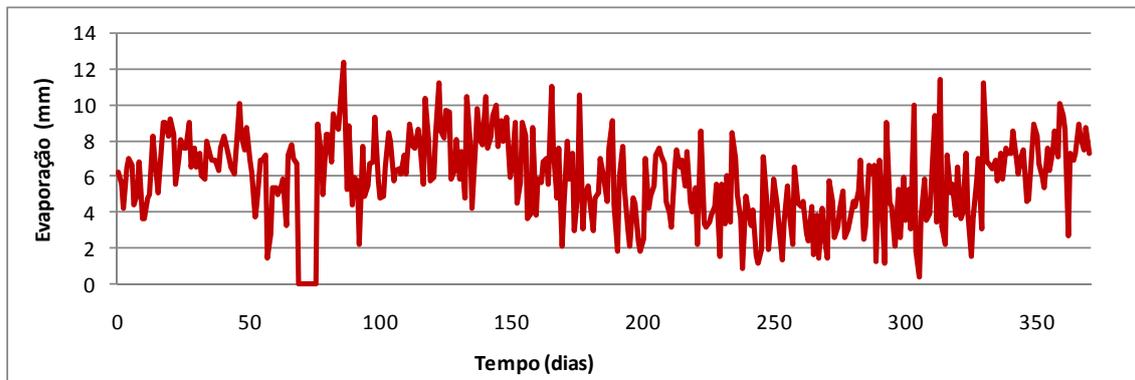
Segundo Monteiro (2003) as condições climáticas influenciam nas reações químicas e cinéticas biológicas de um aterro de resíduos sólidos. Melo

(2003) em seus estudos, relacionou as condições climáticas ao fenômeno de biodegradação e recalque, demonstrando que essas condições interferem de maneira relevante na biodegradação dos resíduos.

A Figura 26 apresentam os dados de precipitação e evaporação da Cidade de Campina Grande no período de outubro de 2007 a outubro de 2008, cujos dados foram fornecidos pelo INEMET.



(a)



(b)

Figura 26: Precipitação (a) e evaporação (b) da cidade de Campina Grande-PB

No período experimental, observou-se baixos valores de precipitações no início do monitoramento até os 150° dia (mês de março) e logo após esse período, as maiores tendências de elevação são registradas até o mês de junho (325° dia de monitoramento) onde houve maior precipitação (máxima 74mm) quando comparados com a evaporação (11mm), sendo este fato já esperado, pois o período de chuvas da cidade é previsível para esta época. Segundo Galvêncio & Ribeiro (2005) a região onde está localizada a cidade de

Campina Grande apresenta baixo índice de precipitação no estado da Paraíba, com valores médios anuais de 760mm.

Já os valores de evaporação estiveram na faixa de 0 a 13mm, sendo os menores valores registrados nos meses de junho e julho, onde a umidade relativa do ar, de acordo com Henrique (2006), alcança os maiores valores registrados durante o ano chegando a valores de 94%.

A construção e o enchimento do lisímetro ocorreram em época de primavera / verão (outubro), e com o baixo índice de precipitação (700mm/ano), elevado índice de evaporação e baixas temperaturas ambiente (22°C) na cidade de Campina Grande, não foi possível registrar através do piezômetro instalado, nenhuma variação na medição do nível de líquidos durante o período de monitoramento.

Embora, ocorra em aterros/lixões à formação de líquidos através do metabolismo microbiano, as condições climáticas são os principais fatores que contribuem para a geração de lixiviados e, visto que na cidade de Campina Grande existe um déficit hídrico, provavelmente, o índice de evapotranspiração maior que o índice de precipitação anual, contribuiu para a ausência de lixiviado no interior do lisímetro em estudo.

Alcântara (2007) em experimentos realizados no município de Recife, Pernambuco, com lisímetros, observou a geração de lixiviado somente após 6 meses de monitoramento, porém essa região do nordeste brasileiro apresenta precipitação anual em torno de 2000mm/ano e temperatura ambiente (30°C) superiores as encontradas na cidade de Campina Grande.

4.2 Parâmetros Físicos

4.2.1 Temperatura

Dentre os fatores abióticos que interferem na atividade microbiana durante a decomposição da fração orgânica de RSU em aterros, a temperatura é um dos mais relevantes, pois afeta diretamente o metabolismo dos

microrganismos (ALCÂNTARA, 2007). De modo geral, temperaturas mais elevadas proporcionam uma maior atividade e aceleram o processo de biodegradação, entretanto a temperaturas maiores que 50°C a atividade enzimática é afetada, pois ocorre a desnaturação de proteínas.

O monitoramento da temperatura no lisímetro foi feito através de três termopares instalados ao longo da massa de lixo, que foi denominado: temperatura 1 (1,45m), temperatura 2 (0,75m), temperatura 3 (0,05m) (Figura 27), como também de termômetro comum de coluna de mercúrio que foi utilizado para medir a temperatura ambiente (TA) no instante da medição interna das temperaturas através dos termopares. Além dessas temperaturas, obteve-se a temperatura ambiente média (TAM) diária da cidade de Campina Grande, fornecidas pelo INEMET (Figura 28).

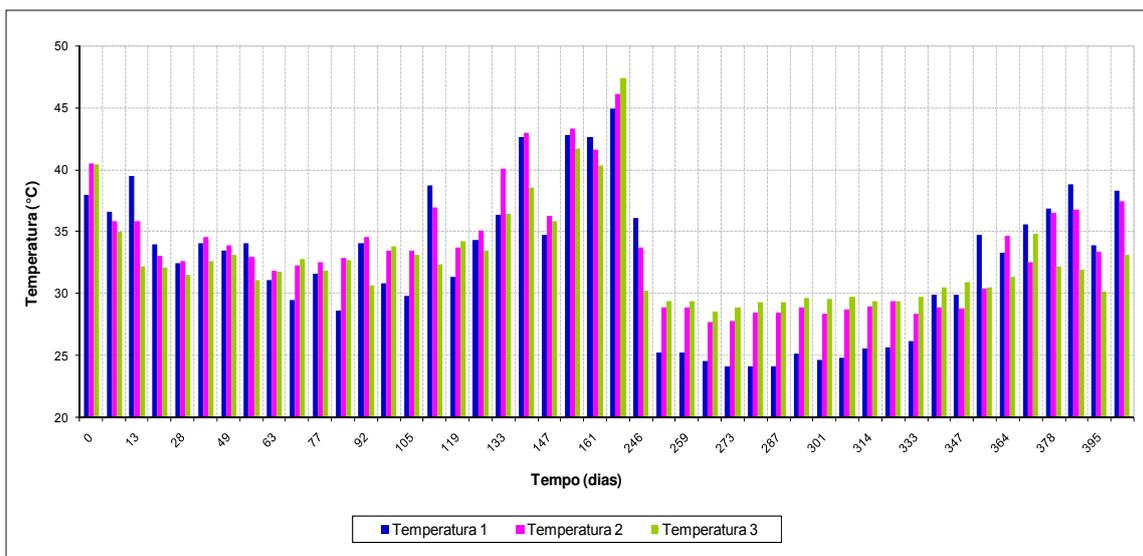


Figura 27: Variação da temperatura dos resíduos aterrados no interior do lisímetro.

A temperatura no interior do lisímetro no início do monitoramento registrou valores máximos em torno de 40°C, podendo ser observado logo após, um decréscimo desses valores. Este aumento na fase inicial pode estar relacionado provavelmente aos microrganismos aeróbios que, ao degradarem a matéria orgânica a compostos mais simples como H₂O e CO₂ liberam calor, pois o processo é exotérmico. Ao longo do tempo o oxigênio do meio é consumido rapidamente e os grupos predominantemente aeróbios dão lugar a

organismos anaeróbios. Contudo estes novos grupos microbianos têm que se adaptar enzimaticamente a este meio. Nesta mudança de fase há um decréscimo na temperatura devido aos microrganismos anaeróbios gerarem menos calor durante o processo de degradação.

Nos períodos entre 100° e 250° dia houve um aumento considerável nas temperaturas medidas no interior do lisímetro, que também se observa na temperatura ambiente média, podendo ser resultado da influência da temperatura externa, havendo possíveis trocas de calor do meio interno com o externo, devido a espessura da parede do lisímetro.

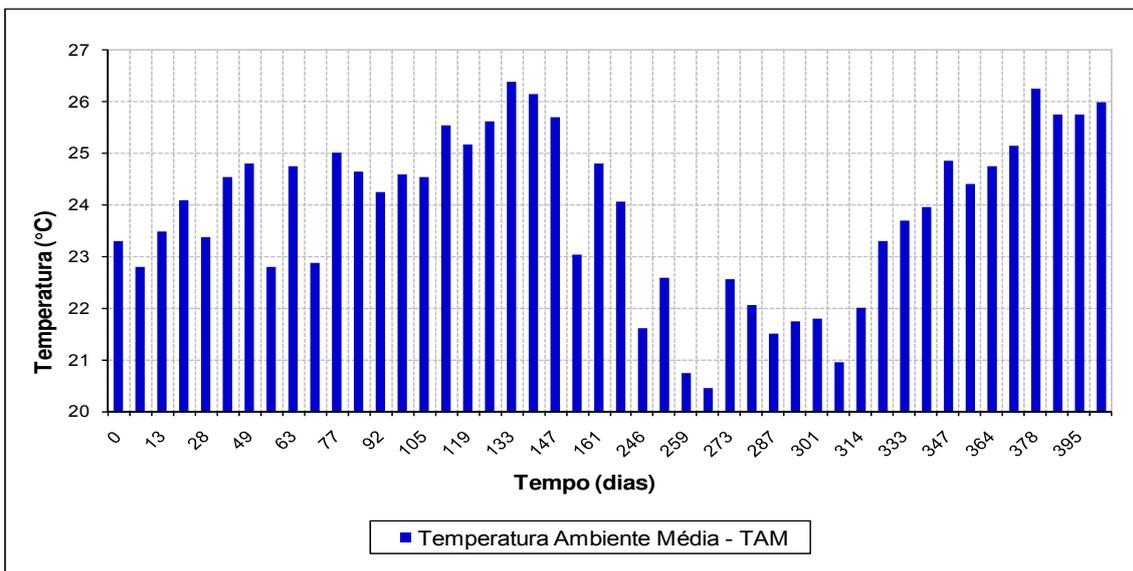


Figura 28: Variação da temperatura ambiente média no decorrer do tempo

No intervalo dos períodos de 250° a 350° dia (Figura 27) de monitoramento ocorreu registros de menores temperaturas, onde também se observa nas temperaturas ambientes médias, pois de acordo com os valores de precipitação (Figura 26 a) entre março e julho foram os mais altos durante o período de monitoramento devido a estação chuvosa da cidade de Campina Grande.

Após os 350° dia, foram registradas variações de temperaturas de 30 a 38°C, podendo ser observados que também houve nesse período uma baixa na precipitação e na temperatura ambiente ocorreu uma semelhança, podendo ser justificado a correlação como já citado anteriormente.

Junqueira (2000) em seu trabalho no Distrito Federal verificou picos elevados no valor da temperatura em uma célula experimental de RSU, após vários meses de aterramento dos resíduos, sendo esses picos relacionados a épocas chuvosas verificando uma forte correlação entre a temperatura e a precipitação/infiltração, o que é bastante semelhante aos registrados no lisímetro em Campina Grande. O autor também cita que a ocorrência de precipitações, permite a entrada de oxigênio dissolvido nas chuvas, essa entrada de oxigênio extra faz com que haja uma desestabilização do meio, permitindo o aumento de organismos aeróbios no meio interno e diminuindo o número de organismos anaeróbios.

A média dos valores de temperatura durante o monitoramento (32°C) apresentou-se de acordo com a literatura técnica, permitindo que ocorra normalmente a degradação microbiana dos resíduos aterrados, pois para uma maior eficiência do processo de digestão anaeróbia, os níveis de temperaturas ótimas são mesofílicos e termofílicos (Figura 29), segundo Tchobanoglous *et al.* (1993).

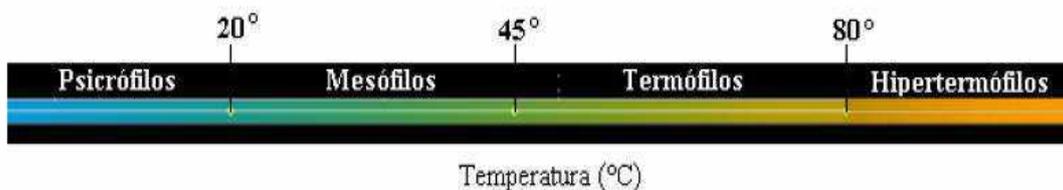


Figura 29: Classificação dos microrganismos em função da temperatura (MADIGAN *et al.*, 2002)

4.2.2 Teor de Umidade

De acordo com Kiehl (1985) é importante a presença de água durante o processo biológico aeróbio de decomposição da matéria orgânica (compostagem) onde a umidade deve permanecer entre 40 a 60% para melhor desempenho da atividade nas bactérias decompositoras.

A variação do teor de umidade durante a fase de monitoramento está apresentada na Figura 30.

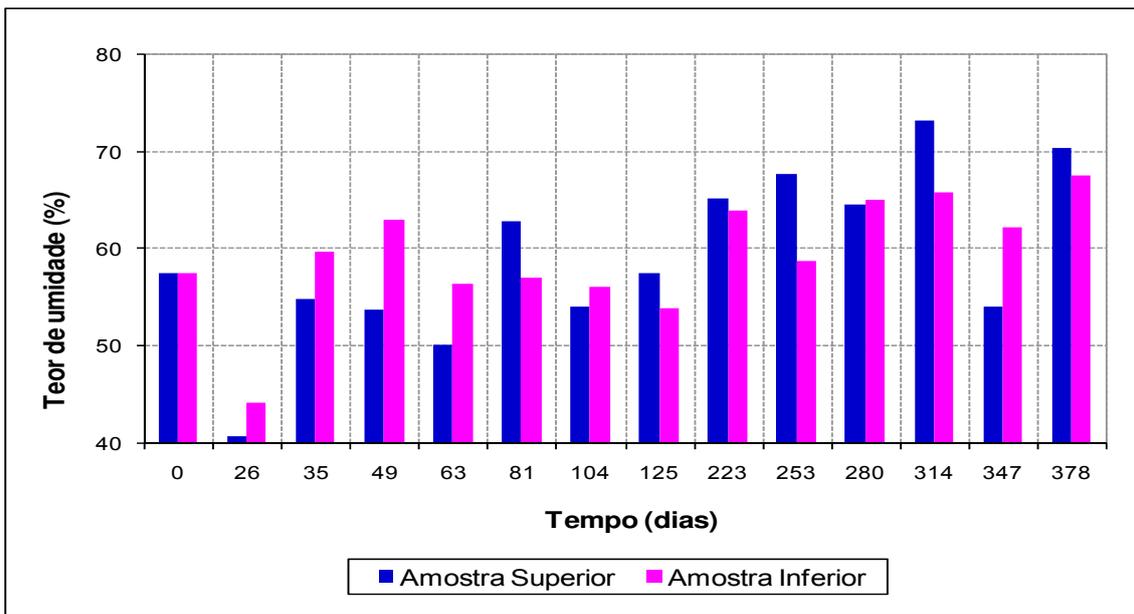


Figura 30: Variação do teor de umidade no decorrer do tempo

De acordo com a Figura 30, a umidade inicial foi alta (57,6%), no entanto, de acordo com Leite (2008), a composição gravimétrica existente no interior do lisímetro é de aproximadamente 70% de material orgânico, sendo assim, contém uma grande quantidade de água ocasionando um elevado teor de umidade.

Já nos primeiros 30° dia houve uma queda da umidade para um valor de aproximadamente 40%, essa redução pode ser justificada, devido à perda de água por evaporação, haja vista que a camada de cobertura do lisímetro não é completamente impermeável, pois evita o fluxo de água, no entanto permite a passagem de gases. Além disso, também ocorreu um período de adaptação devido ao aterramento dos resíduos, passando de um meio aeróbio para outro anaeróbio.

Interessante ressaltar que, embora, houve pouca precipitação (Figura 26) a umidade no interior do lisímetro sempre esteve acima de 40%, chegando até próximo de 70% e conforme Palmizano e Barlaz (1996), a faixa ótima de umidade para degradação biológica deverá ser entre 20-40%, valores fora dessa faixa podem desestabilizar a célula de lixo. Contudo, Alcântara (2007), indicou a faixa de umidade mais adequada ao processo de degradação nos aterros simulados entre 53% a 58% e cita que em lisímetros estudados por

Kinnman *et al.* (1986), foram encontrados valores numa faixa de 44 a 65%. E o que pode ser observado no lisímetro estudado em Campina Grande é que a umidade elevada não afetou a atividade microbiana.

Entre os meses de março e julho, aproximadamente 150° e 280° dia de monitoramento, foram registrados os maiores valores de precipitação e observa-se a alteração dos parâmetros da umidade sendo a partir dessa data a maioria dos valores encontrados sempre superior a 60%.

As pequenas oscilações que ocorreram tanto para amostra inferior quanto para amostra superior podem ser justificadas pela heterogeneidade do material dentro do lisímetro bem como a qualidade/quantidade do material coletado visto que esse material pode ter maior ou menor capacidade de retenção de líquidos. Contudo a compactação dos RSU pode influenciar diretamente, pois quando ocorreram chuvas houve maior quantidade de umidade nas amostras da superfície. Essa umidade poderia ser constante ao longo do lisímetro e até ser maior na parte inferior, pois ocorre a infiltração de líquidos. Mas devido à carga dos RSU ir aumentando com a profundidade, a compactação do extrato inferior do lisímetro também vai aumentando, o que dificulta a passagem e infiltração de líquidos. Como também no período em que cessa a chuva, a quantidade de umidade será maior agora no extrato inferior já que a compactação não permite facilmente a saída deste líquido já infiltrado, isso foi verificado no interior do lisímetro.

Segundo Palmizano e Barlaz (1996), a faixa ótima de umidade para degradação biológica deverá ser entre 20-40%, valores fora dessa faixa podem desestabilizar a célula de lixo. Contudo, Alcântara (2007) em sua pesquisa com um lisímetro, com dimensões um pouco maiores ao monitorado nesta pesquisa, encontrou valores médios que indicaram a faixa de umidade mais adequada ao processo de degradação nos aterros simulados entre 53 a 58% e cita que em lisímetros com dimensões semelhantes, estudados por Kinnman *et al.* (1986), foram encontrados valores numa faixa de 44 a 65%. Já Palma *et al.* (2000), consideram como favorável ao processo de bioestabilização da fração orgânica dos resíduos aterrados a umidade dentro da faixa entre 50 e 70%, que foram os encontrados durante o monitoramento.

4.3 Parâmetros Físico-Químicos

4.3.1 Potencial hidrogeniônico (pH)

De acordo com Alcântara (2007), a quantificação dos valores de pH em processos de tratamento biológico, como aterros de RSU, permite avaliar preliminarmente o desempenho do processo de digestão anaeróbia, pois a variação desse parâmetro na massa de resíduos aterrados ou no lixiviado gerado está associada às etapas de degradação em aterros sanitários.

Segundo Pohland & Harper (1985) *apud* Catapreta (2008), o pH pode variar com o tempo de degradação dos resíduos. Na fase inicial do processo de degradação, o pH é normalmente mais baixo devido à produção de ácidos pelas bactérias hidrolíticas e fermentativas, mas com o avanço do processo de degradação biológica da matéria orgânica, os valores de pH se elevam em função do consumo dos ácidos pelas bactérias metanogênicas e pela maior produção de gases.

A Figura 31 apresenta a variação do pH no interior do lisímetro em estudo no decorrer do tempo de monitoramento.

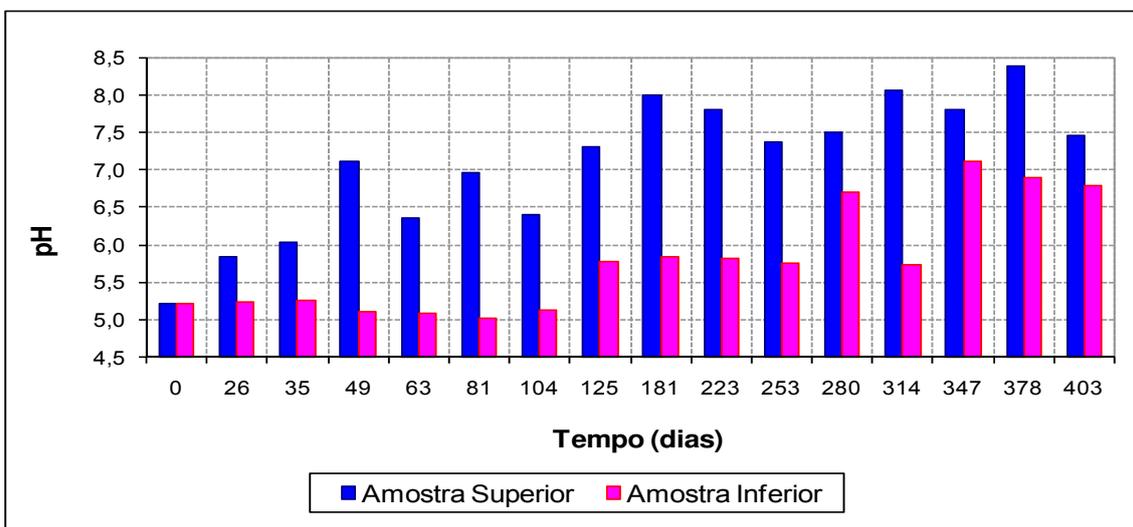


Figura 31: Variação do pH no decorrer do tempo

A degradação de RSU aterrados ocorre em 5 fases, onde a fase I é uma fase de ajuste inicial, no qual os componentes biodegradáveis dos resíduos

sólidos urbanos em decomposição microbiológica são colocados no aterro sanitário. Esta fase é geralmente ácida e isso foi verificado no lisímetro (Figura 31) nos extratos superiores de RSU durante os primeiros 35 dias. Já nos extratos inferiores de RSU este comportamento ácido (pH em torno de 5 e 6) foi observado em cerca de 100 dias de monitoramento e isso pode ser justificado pelo fato de que nesta porção inferior o metabolismo é anaeróbio, portanto mais lento, o que faz com que as fases de degradação sejam mais demoradas.

A fase II é identificada como fase de transição (de ambiente aeróbio para anaeróbio), o oxigênio é consumido e condições anaeróbias começam a se desenvolver. Na amostra superior, a fase I e II pode ser caracterizada como incomum, sendo a fase ácida muito curta, pois já nos primeiros 50 dias o pH estava em torno de 7,0 caracterizando possivelmente a fase metanogênica. Isso pode ser devido ao rápido metabolismo das bactérias aeróbias, consumindo assim materiais facilmente degradados por este grupo e formando subprodutos para a atividade metanogênica.

A fase III é onde a atividade microbiológica iniciada na fase II é acelerada com a produção de significativas quantidades de ácidos orgânicos e menores quantidades de gás hidrogênio.

A fase IV é onde acontece a conversão do ácido acético e hidrogênio, formado pela fase anterior, para metano e dióxido de carbono. E a fase V é a fase que ocorre depois que a matéria orgânica facilmente degradável tenha sido convertida em metano e dióxido de carbono na fase IV.

As transições das fases III e IV no lisímetro não foram facilmente identificadas, nos extratos superiores, já nos inferiores essa transição é bem visível, possivelmente por esse ambiente não sofre tanta influencia do ambiente externo e além do mais ser um meio anaeróbio.

No decorrer do tempo, o pH para as amostras superiores manteve-se para amostra superior entre 7,0 e 8,0 a partir dos 125º dia de monitoramento, demonstrando valores entre neutralidade e alcalinidade.

A variação do pH para as amostras inferiores ocorreu entre a faixa de 5,7 a 7,1 a partir dos 280º dia de monitoramento, caracterizando bem o estabelecimento das fases de degradação de RSU aterrados.

Sendo assim, as amostras inferiores demonstram através da variação do pH, o provável desenvolvimento das fases acidogênicas e metanogênicas, onde esse parâmetro permaneceu estável em valores ácidos para os primeiros momentos de degradação e posteriormente atingiu valores entre neutralidade e alcalinidade (pH em torno de 8).

Segundo Speece (1996) *apud* Silva (2007), o valor de pH em torno de 7,0 é condição indispensável para o bom desempenho da atividade metanogênica e de acordo com Oliveira (2005) as bactérias produtoras de ácidos têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre 5,0 e 6,0 e podem mostrar-se ativas até para valores de pH da ordem de 4,5. As bactérias produtoras de metano têm um crescimento ótimo na faixa de pH entre os 6,6 e os 7,4.

Alcântara (2007) em seus estudos com lisímetros encontrou valores em torno de 6,0 para as fases I e II, a maioria dos valores entre de 6,0 e 7,0 para a fase III e uma faixa de variação entre 7,0 e 8,0 na fase IV caracterizando cada fase (acidogênica, acetogênica e metanogênica) conforme os padrões da literatura técnica.

O resultado encontrado por Alcântara (2007) foi semelhante ao ocorrido nesta pesquisa para a amostra inferior do lisímetro em estudo e cita que esse parâmetro é importante para estabelecer os limites entre a fase ácida e a fase metanogênica do processo de degradação dos RSU.

4.3.2 Sólidos Voláteis

Tendo em vista que o teor de sólidos voláteis, expresso como uma porcentagem dos sólidos totais é utilizado normalmente como uma medida indireta de biodegradabilidade da fração orgânica de RSU, quanto maior o teor de sólidos voláteis, maior a quantidade de matéria orgânica a ser decomposta e mais recente o lixo confinado (decomposição em estado inicial).

Diante de adaptações de metodologias e problemas operacionais no início do período de monitoramento, a análise de sólidos voláteis só foi realizada a partir dos 181º dia de monitoramento.

A Figura 32 mostra o teor de sólidos voláteis determinados a partir desse período.

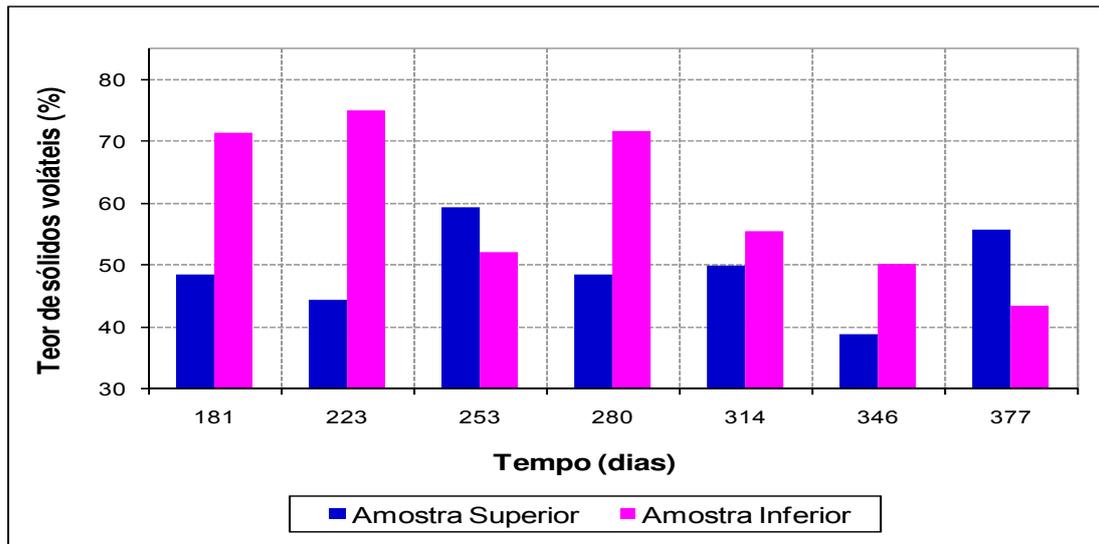


Figura 32: Evolução do teor de sólidos voláteis dos resíduos sólidos aterrados

Na parte superior do lisímetro, os Sólidos Voláteis (SV) apresentaram valores mais baixos (40 a 60%) que as amostras inferiores (45 a 75 %), sendo isso perfeitamente possível, pois nas camadas superiores de RSU ocorre a degradação biológica aeróbia que é cineticamente mais rápida que a anaeróbia, portanto os valores de SV são menores. No entanto, houve um decaimento dos SV com o passar do tempo em ambos os estratos de RSU, o que é justificável pela depleção da matéria orgânica com o passar do tempo, embora isso não seja observado com todos os números de microrganismos apenas o grupo coliformes obteve esse comportamento durante o tempo de monitoramento (Figuras 36).

Melo (2003), contrariamente, observou em seus estudos um decaimento do número de microrganismos em células de RSU com o passar do tempo e os relacionou com a queda de SV e até mesmo recalques. Talvez isso não tenha sido observado no lisímetro estudado em Campina Grande devido ao pouco tempo de disposição dos resíduos (apenas 1 ano) enquanto nas células de

RSU estudados por Melo (2003) têm mais de 4 anos de disposição de RSU. Além do mais durante os estágios finais de crescimento microbiano ocorre à fase de latência, em que os microrganismos viáveis são iguais aos não viáveis e isso pode indicar o porquê desses valores de microrganismos inalterados (Figura 38 e 39).

4.3.3 DBO e DQO

Verifica-se a partir da Figura 33 que nos primeiros meses de monitoramento os valores de DQO variaram em média de 9.697,0 a 17.094,0 mgO₂/L, onde após esse período houve um aumento considerável, chegando a valores de até 53000 mgO₂/L para amostra inferior. Os resultados de DQO aumentam com o tempo em vez de decaírem, porém esses resultados são possíveis pois o amostrador de coletas não estava confeccionado e havia muito plástico aderido às paredes do lisímetro e, portanto as análises continham muito plástico e pouca matéria orgânica.

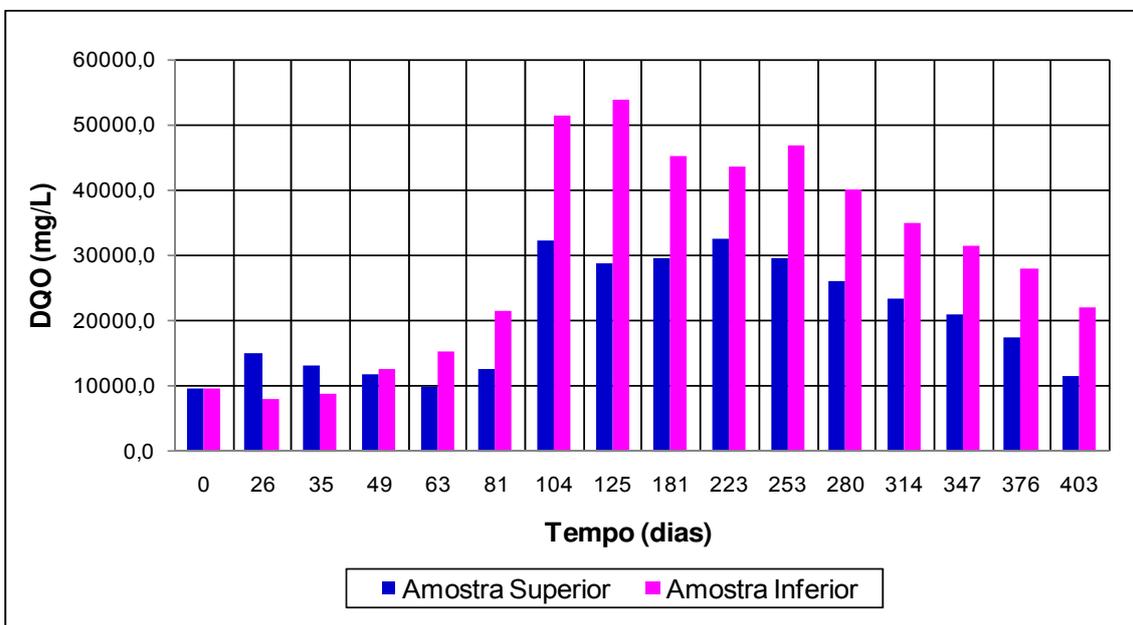


Figura 33: Evolução da concentração de DQO dos resíduos sólidos aterrados

Após 81º dia aproximadamente os valores foram bruscamente alterados. Notava-se nitidamente que o material coletado passou de uma aparência seca

a úmida e os plásticos estavam mais aderidos a matéria orgânica devido possivelmente a esta degradação.

A partir dos 125 dias percebeu-se um decréscimo da DQO tanto nos extratos superiores como inferiores de RSU. Vale salientar que nas camadas inferiores de RSU sempre houve um maior valor de DQO, provavelmente ao processo de lixiviação de líquidos.

Já com relação a DBO (Figura 34) de acordo com os valores de pH (apresentados na Figura 31), é possível supor em que fase de decomposição se encontram os RSU: a fase inicial, acidogênica, ou de fermentação ácida, caracteriza-se por valores de pH baixos e DBO altas. A segunda fase, a de fermentação metanogênica caracteriza-se por valores de pH mais elevados e DBO menores, onde observa-se a partir dos 180° dia de monitoramento. Nessa fase existe a decomposição dos produtos da fermentação ácida, sendo convertidos em metano (CH₄), substâncias húmicas e água.

Assim como a DQO, a DBO apresentou valores elevados, tendendo ao decréscimo, compatíveis com a fase metanogênica de decomposição. No período de monitoramento correspondente aproximadamente até o 100° dia, observa-se valores de pH baixos e concentrações de DBO mais elevadas, compatíveis com a fase inicial, acidogênica. Importante comentar que os valores iniciais de DBO das duas primeiras coletas foram descartados, devido a erros operacionais cometidos durante o ensaio.

Comparando a faixa de valores obtidos com amostras de lixiviados da literatura, Pfeffer *et al.* (1997), cita valores para resíduos recentes (<1ano) numa faixa entre 10.000 a 40.000mg/l para DQO e 7.500 – 28.000mg/l para DBO. Percebe-se que a maioria dos valores de DQO estão dentro desta faixa, contudo os valores de DBO não chegaram a alcançar nem o valor mínimo do intervalo supracitado.

Durante o período que compreende de 280° a aproximadamente 400° dia ocorre um decréscimo na DQO (40000 mg/L a 23000 mg/L) e um ligeiro decréscimo da DBO (3700 mg/L) e isso pode estar relacionado com o aumento de pH, ou seja, neste momento ocorre a formação de metano e decresce a matéria orgânica e aumenta os valores de pH.

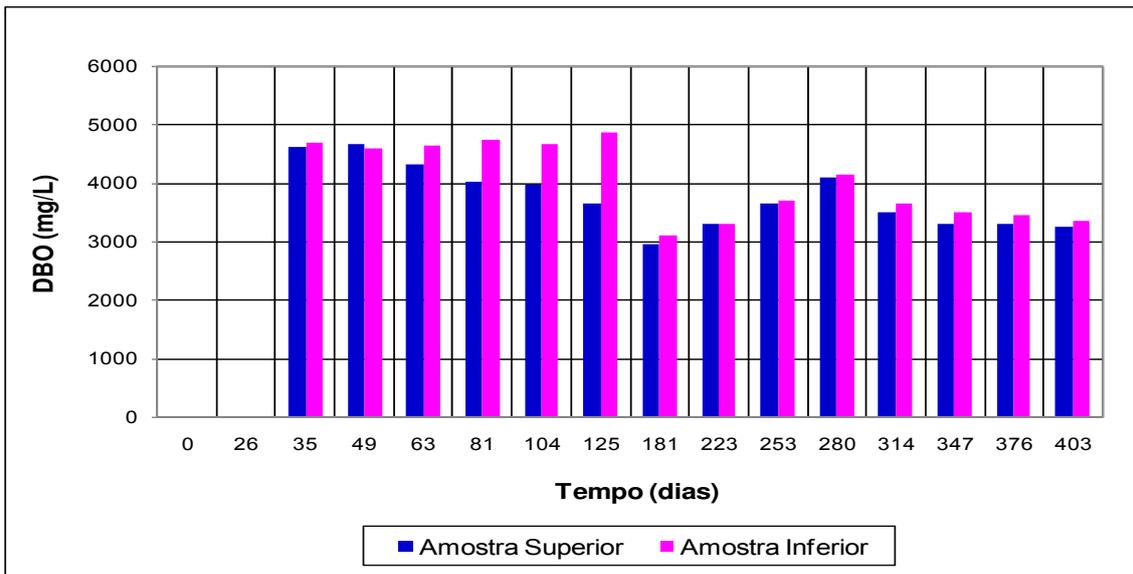


Figura 34: Evolução da concentração de DBO dos resíduos sólidos aterrados

A Figura 35 mostra, a evolução da relação DBO/DQO dos resíduos aterrados durante o monitoramento do lisímetro. Observa-se uma tendência ao decaimento dessa relação em ambas as porções, apontando para a bioestabilização dos resíduos. Para amostra superior essa relação variou 0,43 e 0,10, confirmado a estabilização dos resíduos e transição para a fase metanogênica, já para amostra inferior essa relação variou entre 0,53 e 0,07.

Observa-se que no 35° dia os valores da amostra inferior foram mais elevados que para amostra superior confirmando a maior duração da fase ácida. Apesar das baixas relações DBO/DQO na amostra inferior obtidos, principalmente, a partir do 100° dia de monitoramento, outros parâmetros, principalmente o pH, apontam que essa porção ainda está em predominância da fase ácida. Esses valores podem indicar também a predominância de compostos orgânicos pouco biodegradáveis nesta porção. Vale salientar que essas relações foram obtidas a partir dos parâmetros obtidos a partir da diluição dos resíduos aterrados, e não do lixiviado.

Embora, os valores de pH, DQO e DBO estejam relacionados e isso é visto claramente no lisímetro o mesmo não ocorre com os microrganismos aeróbios. Estes se apresentaram praticamente constantes ao longo do monitoramento. Melo (2003) observou claramente em seus estudos com uma

célula de aterro que com o passar do tempo os valores de DQO e DBO decresciam juntamente com os microrganismos (aeróbios e anaeróbios) e aumento do pH. Contudo, durante o monitoramento do lisímetro não foi possível monitorar organismos anaeróbios, portanto não se pode afirmar com objetividade se estes estão relacionados com a DBO e DQO como também de pH. Porém nos coliformes fecais (Figura 37) percebe-se um claro decréscimo desse grupo com o tempo corroborando com os dados de DBO e DQO.

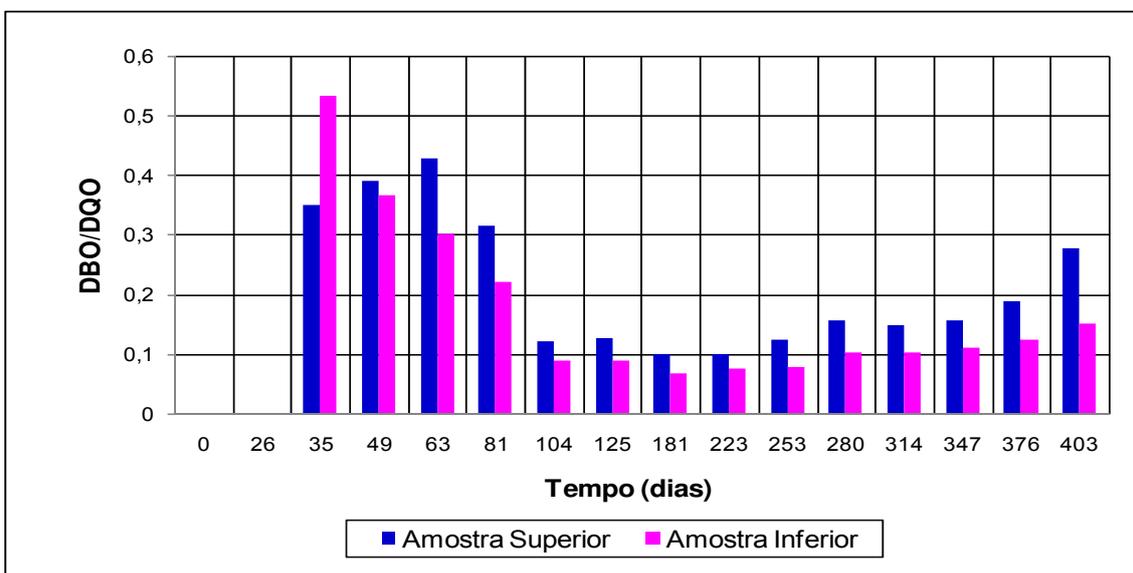


Figura 35: Evolução da relação DBO/DQO dos resíduos sólidos aterrados.

4.4 Parâmetros Químicos

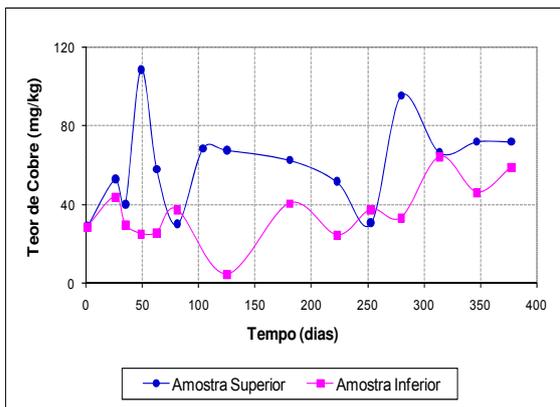
4.4.1 Metais

Alguns metais em baixas concentrações são elementos essenciais aos animais, aos seres humanos e aos vegetais superiores, como por exemplo o cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) etc (FERREIRA 2006). Tanto os metais essenciais como os não-essenciais causam problemas ao metabolismo de seres vivos, se absorvidos acima de certas quantidades.

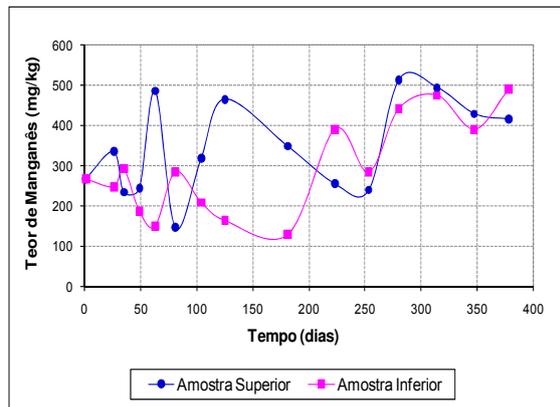
A Figura 36 (a), (b), (c) e (d) apresenta o teor dos metais: cobre, manganês, ferro e zinco durante o tempo de monitoramento do lisímetro.

De acordo com Melo (2003) as concentrações de metais tendem a inicialmente serem altas, pois os resíduos apresentam disposição recente e conseqüentemente apresenta altas concentrações de metais, porém, espera-se que com o passar do tempo, as concentrações pontuais tenham um decréscimo, devido a processos físicos, químicos e biológicos.

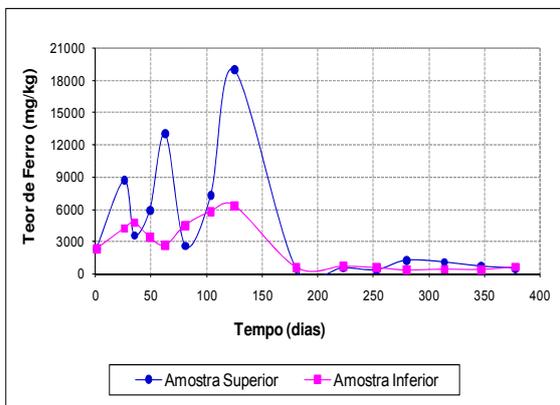
Ocorre esse fato, portanto nos teores de ferro e zinco, que inicialmente mostraram valores altos, que podem ser justificados pela camada de cobertura apresentar teores elevados desses metais, conseqüentemente influenciando na camada de resíduos, no entanto após 200º dia de monitoramento apresentaram valores baixos permanecendo estáveis durante o restante do período de monitoramento.



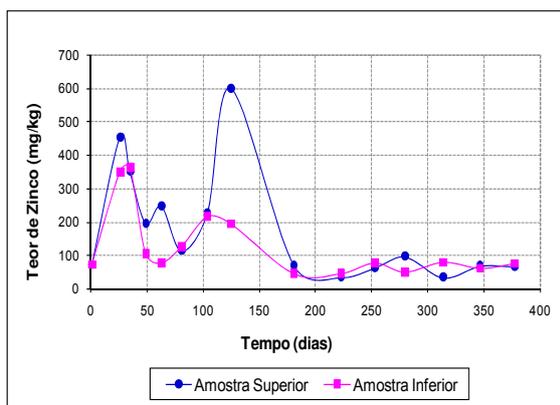
(a) Teor de cobre



(b) Teor de manganês



(c) Teor de ferro



(d) Teor de zinco

Figura 36: Teor de cobre (a), manganês (b), ferro (c) e zinco (d) no decorrer do tempo

Embora os metais possam ter influência no processo biodegradativo, não se observou evidências que pudessem afetar a contagem de microrganismos durante o período do monitoramento biológico.

Melo (2003), estudando os comportamentos dos metais ao longo da profundidade do seu lisímetro e do tempo do seu monitoramento, constatou uma diminuição destes elementos, principalmente na parte superior da célula experimental, pelo fato da lixiviação. Isso pode ter ocorrido no lisímetro em estudo, pois o material orgânico não degradável e inerte, pode ter se agregado aos metais, não o disponibilizando aos microrganismos, fazendo com que esses teores não influenciassem no metabolismo.

Além do mais, o pH alto segundo Monteiro (2003), favoreceu a precipitação desses metais, acumulando-os na base do lisímetro e isso foi observado no lisímetro monitorado, principalmente nos dias com precipitação pluviométrica (aproximadamente 150° a 250° dia de monitoramento), que há uma lixiviação dos líquidos para os extratos inferiores, demonstrando que nesse período ocorre uma diminuição dos teores de metais da amostra superior e um leve aumento para amostra inferior.

4.5 Parâmetros Microbiológicos

Os microrganismos presentes em um lisímetro podem indicar a evolução do comportamento biodegradativo. Desta maneira, o número de microrganismos pode ser um indicador da fase em que o aterro de resíduos sólidos se encontra.

Durante o período de monitoramento, os grupos de microrganismos: coliformes totais e termotolerantes, apenas foram possíveis a apresentação de alguns resultados, pois ocorreram problemas. Já os ensaios de quantificação de anaeróbios totais, que seriam fundamentais para pesquisa, foram feitas várias tentativas para montagem e adaptação de metodologia para a realização dessas análises, porém não foi possível a determinação desse grupo de microrganismos.

4.5.1 Coliformes Totais e Termotolerantes

A Figura 37 mostra que nos meses de agosto e setembro de 2008 a concentração de coliformes totais (CT) na massa de resíduo estava na ordem de aproximadamente 10^9 NMP/100mL e em seguida houve uma brusca queda para uma faixa de 10^2 - 10^3 NMP/100mL que, apesar de não ter dados anteriores para justificar esse fato, pode-se associar a precipitações nessa época dos dois primeiros meses, pois foi observado fissuras na camada de cobertura do lisímetro, provocando assim uma infiltração das chuvas por caminhos preferenciais e uma lavagem do resíduo diminuindo a microbiota, consequentemente provocando uma grande quantidade de oxigênio disponível no aterramento dos resíduos, diminuindo o crescimento desses microrganismos.

A redução dos microrganismos não se dá somente pela presença de precipitações e sim também devido a redução da matéria orgânica disponível, como também concordando com a diminuição dos valores de DBO e DQO.

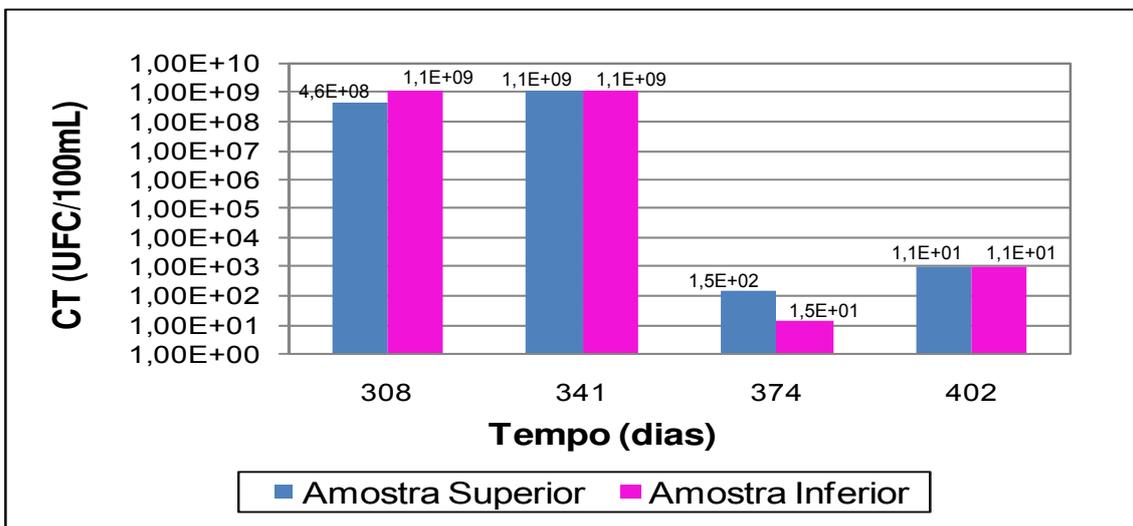


Figura 37 Concentração de coliformes totais no decorrer do tempo.

Durante o processo de biodegradação a competição dos diversos grupos de microrganismos e a presença de metabólitos gerados durante a degradação dos resíduos, pode ter sido a causa da redução do crescimento dos CT nos últimos meses de monitoramento.

Estudos realizados por Monteiro (2003) mostram que o NMP dos microrganismos do grupo coliforme, variaram da ordem de grandeza de 10^3 a 10^5 NMP/100mL, tanto para resíduos sólidos quanto para lixiviados. Comparando com o lisímetro em estudo, o NMP desse grupo de microrganismos mostra que os resultados das últimas análises estão dentro dessa faixa apresentada.

A evolução do NMP de coliformes termotolerantes (CTT) na massa de resíduo pode ser vista na Figura 38 na qual é possível perceber que os dados de CT e CTT apresentam semelhanças nas duas últimas coletas, onde os valores permaneceram iguais. Diante de resultados da literatura técnica, os valores encontrados nesta pesquisa são considerados baixos, uma vez que provêm de aterros sanitários.

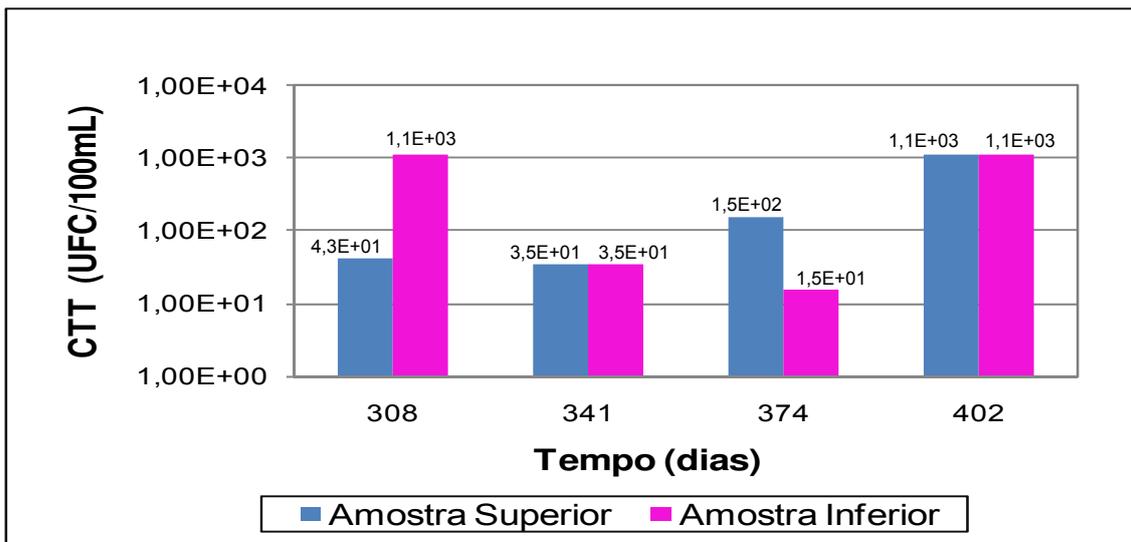


Figura 38: Concentração de coliformes termotolerantes no decorrer do tempo.

4.5.2 Aeróbios Totais

Os lisímetros são modelos de aterros sanitários em escala laboratorial, cuja finalidade é simular e acelerar a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos, proporcionando o maior conhecimento dos processos microbiológicos.

As bactérias encontradas nos RSU podem ser aeróbias, anaeróbias ou facultativas a depender da fase de decomposição dos resíduos e as condições de oxigenação do ambiente.

Observa-se na Figura 39 que, a quantidade de microrganismos manteve-se relativamente semelhante a valores encontrados por Melo (2003) nos estudos desenvolvidos no aterro da Muribeca (PE), onde ocorreram oscilações que variaram em média de 10^5 a 10^6 UFC/100mL em resíduos.

No lisímetro em estudo observa-se que até os 80° dia de monitoramento houve um decaimento desses microrganismos aeróbios, que pode está relacionado com o rápido consumo de oxigênio do meio, fazendo com que ocorra os microrganismos anaeróbios.

O período que corresponde a uma maior precipitação pluviométrica acarretou um crescimento das bactérias aeróbias, que por sua vez, manteve seu crescimento para amostra superior, onde já era esperado, pois, com a presença de chuvas ocorreu uma maior concentração de oxigênio desfavorecendo o crescimento dos microrganismos anaeróbios, que estão presentes provavelmente na porção inferior (correspondente aos 120° a 220° dia de monitoramento). Porém, uma vez restabelecidas as condições para crescimento, esses microrganismos podem atingir rapidamente o seu estágio de crescimento anterior.

É importante observar que a amostra superior na maioria do tempo de monitoramento obteve valores superiores, podendo ser justificado por fissuras na camada de cobertura, circunstância que pode ter facilitado a entrada de oxigênio.

Deve-se ressaltar que houve problemas no lisímetro quanto aos orifícios feitos para retirada das amostras de resíduos, portanto, houve a necessidade de abrir outros orifícios, sendo este fato influente para a entrada de oxigênio e consequentemente um aumento na contagem desses microrganismos.

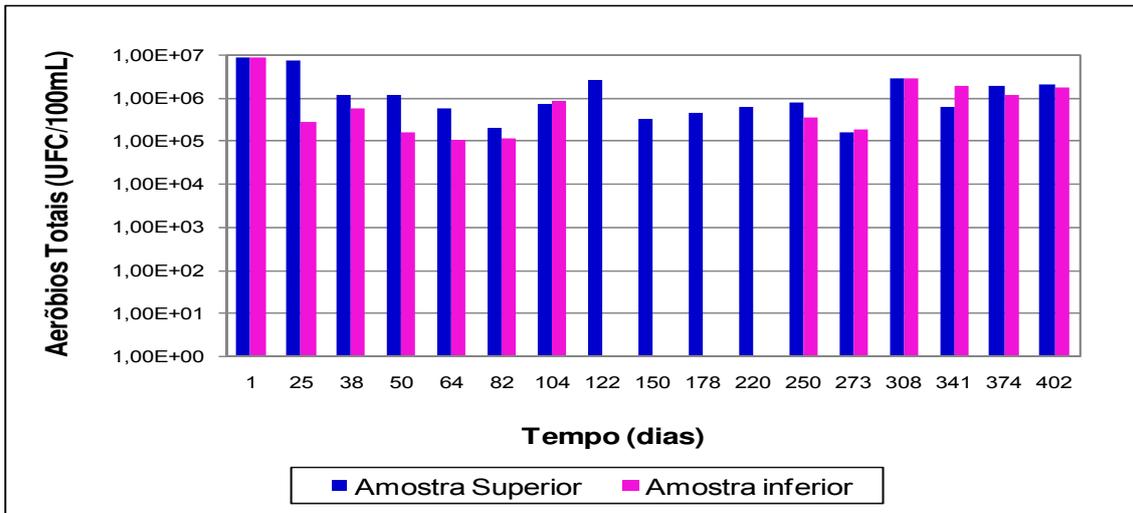


Figura 39: Concentração de microrganismos aeróbios no decorrer do tempo.

4.5.3 Fungos

Os fungos são organismos eucarióticos, quimio-heterotróficos, necessitam de componentes orgânicos para energia e fonte de carbono. A grande maioria dos fungos são aeróbios, porém há espécies anaeróbias facultativas e apenas poucos, ainda não muito conhecido, são anaeróbios e se reproduzem por esporos, forma de reprodução ou de resistência a agressões ou estresse externos (Tortora, 2000). Apresentam grande importância médica, industrial e ambiental.

Na Figura 40 é possível perceber que as contagens de fungos até aproximadamente 220º dia foram predominantemente maiores nas amostras coletadas no nível mais superficial. Isso ocorreu certamente porque, como já comentado, havia maior disponibilidade de oxigênio, possibilitando assim, o crescimento de um maior número de espécies desses microrganismos, já que a maioria destes são aeróbios.

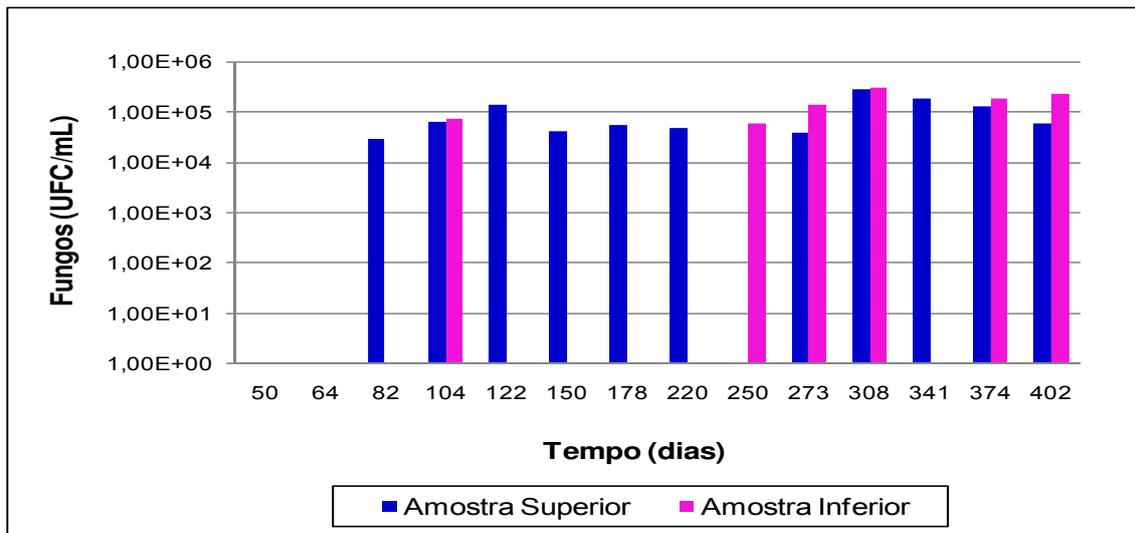


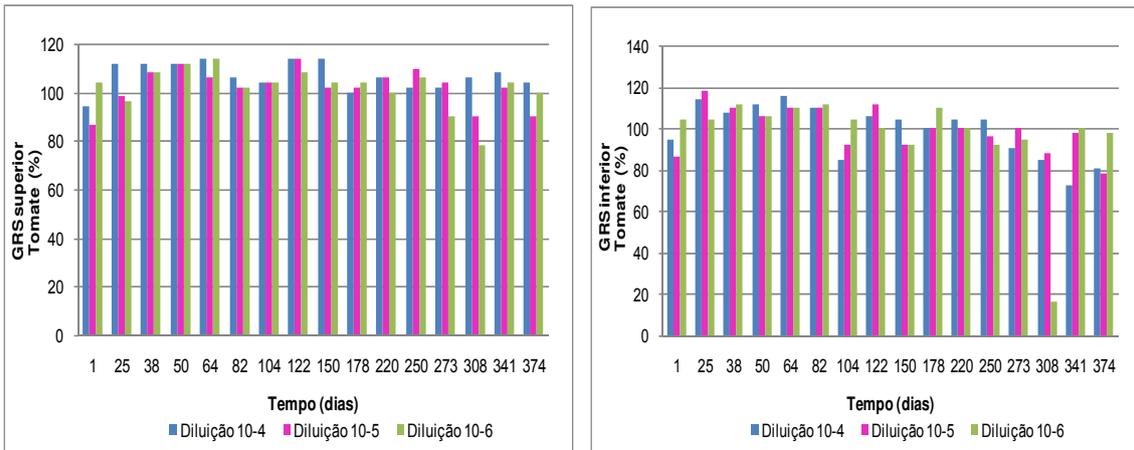
Figura 40: Concentração de fungos no decorrer do tempo.

Os fungos necessitam basicamente de umidade, calor e fonte de carbono para sobreviver e como este grupo se desenvolve em condições adversas, possivelmente, como a umidade no interior do lisímetro sempre foi elevada (em média 60%) e a matéria orgânica (70%) está presente em grande quantidade, houve uma influência positiva em seu crescimento.

O crescimento de fungos também pode ser explicado pelo fato da grande quantidade de material orgânico ser a celulose presente na massa de lixo. Estes compostos são hidrolisados por estes organismos que secretam enzimas que irão degradá-los a compostos que poderão ser absorvidos posteriormente (MELO – artigo não publicado). As temperaturas que oscila entre 35 a 65°C permitem que organismos fúngicos se desenvolvam de maneira satisfatória, portanto, de acordo com os resultados observados neste estudo esta fase de temperatura está compatível para o seu desenvolvimento.

4.6 Toxicidade e Biodegradação

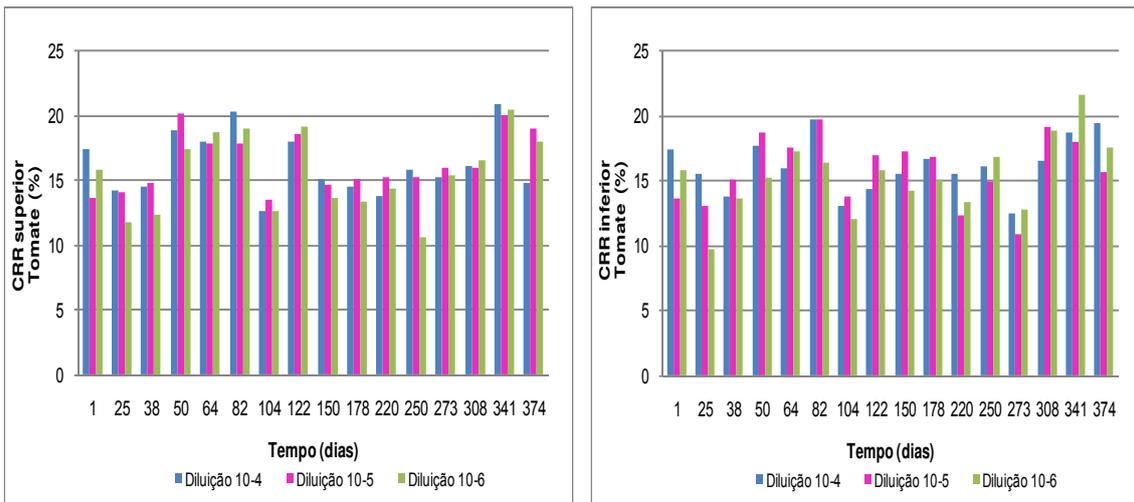
De acordo com as Figuras 41 e 42, apresentam respectivamente os resultados dos ensaios de fitotoxicidade através da germinação relativa da semente (GRS) e o crescimento relativo da raiz (CRR), feitos com as sementes de tomate em diferentes diluições, para amostras superiores (a) e inferiores (b).



(a) GRS – Amostra Superior

(b) GRS – Amostra Inferior

Figura 41: GRS para semente de tomate.



(a) CRR – Amostra Superior

(b) CRR – Amostra Inferior

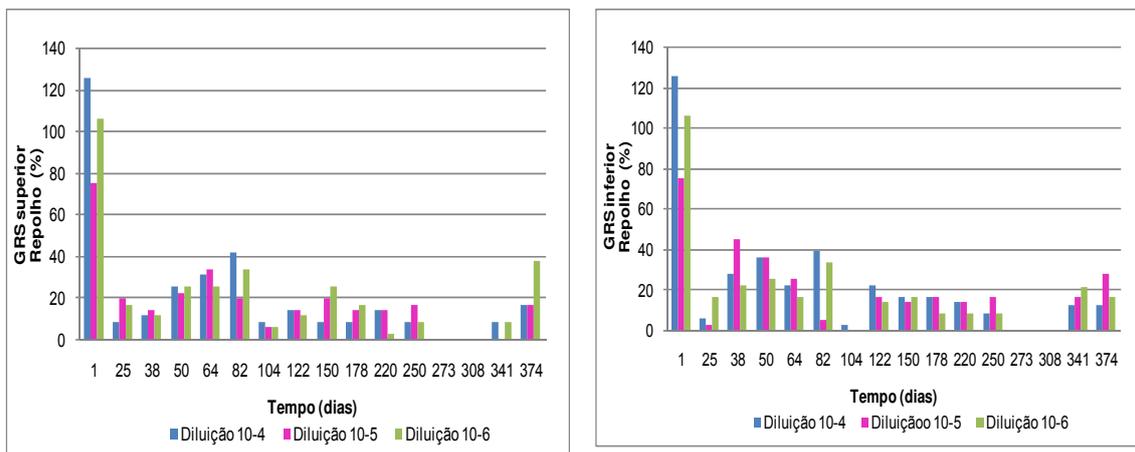
Figura 42: CRR para semente de tomate.

Observa-se que nas Figuras 41 e 42, no geral há uma semelhança entre as amostras superior e inferior, verificando-se, portanto valores médios de 80 a 120% para a germinação relativa da semente (GRS), similares para (a) e (b) e valores de variação para o crescimento relativo da raiz (CRR) de 10 a 15 % para as amostra superiores e inferiores. Conforme demonstrado, pode-se dizer que não existiu variação de toxicidade, referente à semente de tomate, em relação à profundidade dos resíduos depositados no lisímetro.

Os resultados obtidos no lisímetro em estudo mostraram-se semelhantes aos obtidos por Tiquia *et al.* (1996) com relação à germinação de sementes e crescimento da raiz, ou seja, os índices de germinação foram superiores ao do comprimento da raiz.

Isto pode ser explicado, pelo fato que a germinação é dependente de água. Como sugere a literatura, entre os fatores do ambiente, a água é o fator que mais influencia o processo de germinação. Com a absorção de água, ocorre a reidratação dos tecidos e, conseqüentemente, a intensificação da respiração e de todas as outras atividades metabólicas, que resultam com o fornecimento de energia e nutrientes necessários para a retomada de crescimento por parte do eixo embrionário. Assim, permitiu que os resultados fossem maiores para a germinação da raiz, uma vez que, a presença de água ativou processos enzimáticos necessários a germinação das sementes.

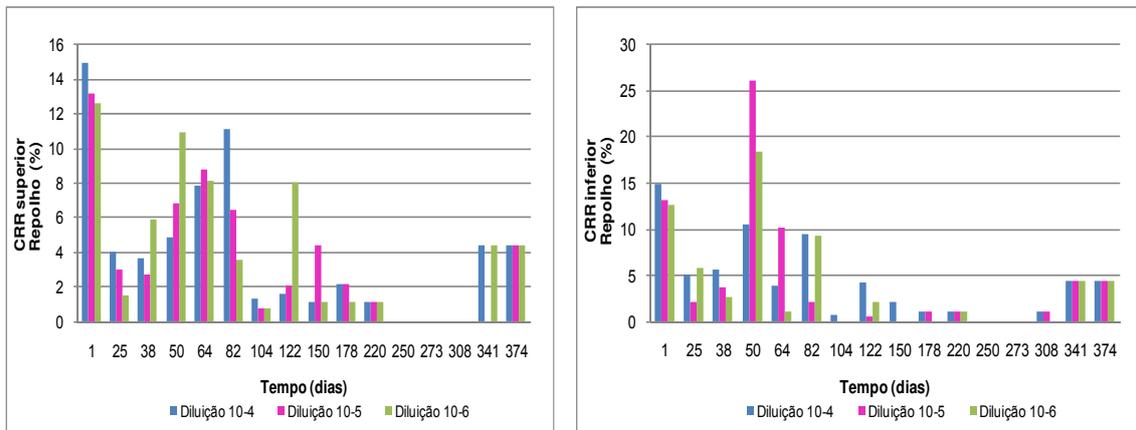
As Figuras 43 e 44 mostram, respectivamente, os resultados dos ensaios de fitotoxicidade através da germinação relativa da semente (GRS) e o crescimento relativo da raiz (CRR), feitos com as sementes de repolho em diferentes diluições, para amostras superiores (a) e inferiores (b).



(a) GRS – Amostra Superior

(b) GRS – Amostra Inferior

Figura 43: GRS para semente de repolho.



(a) CRR – Amostra Superior

(b) CRR – Amostra Inferior

Figura 44: CRR para semente de repolho.

De uma maneira geral, a toxicidade para ambos os parâmetros das sementes de repolho (crescimento e germinação da raiz) pesquisados no teste de fitotoxicidade apresentou oscilações. Não houve tendência de aumento ou diminuição da toxicidade do lisímetro ao longo da profundidade. Isto contrariou o esperado, uma vez que, a massa de lixo depositada nas camadas inferiores é mais velha, portanto o lixo é mais maduro, sendo menos tóxicos (MELO, 2003).

Contudo, o lisímetro estudado encontrava-se possivelmente na fase metanogênica, o que contribuiria para elevação do pH em toda a sua extensão. Observa-se que no lisímetro, o pH ficou em torno de 8 na fase final de monitoramento. A elevação do pH, possivelmente poderia contribuir para menor toxicidade dos metais, pois, em pH altos os metais precipitam e ficam retidos no material depositado do aterro.

Estudos realizados por Melo (2003) no lixiviado presente em célula de RSU do Aterro da Muribeca foi altamente tóxico se comparado aos resíduos para o desenvolvimento das sementes. Tal fato, segundo esse mesmo autor, pode ocorrer devido ao lixiviado possivelmente apresentar metais, bem como outros contaminantes tóxicos dissolvidos em solução. Portanto, com maior facilidade de absorção pelas raízes. Os resíduos podem conter um número significativo de metais, contudo, estar complexados às frações óxidos-Fe, Mn,

orgânica e residual apresentando pouca mobilidade e, portanto, menor toxicidade.

No lisímetro estudado não houve ensaios em lixiviados, pois não apresentou líquidos provenientes da degradação e nem de precipitações, assim não se pode comparar o lixiviado aos resíduos do lisímetro.

É importante perceber que o teste de fitotoxicidade é um indicador do nível de contaminação e bioestabilização, porém existem diversos componentes e compostos que interferem nos índices calculados para esse teste, inclusive outros parâmetros que não foram discutidos nesta pesquisa, que também podem estar presentes no lisímetro e interferir nos resultados finais do teste de fitotoxicidade.

Foi realizada uma análise estatística (análise de variância - ANOVA) para testar a condição de igualdade das médias dos valores da germinação relativa da raiz (GRS) para amostra superior e inferior da semente de tomate, onde observou-se que os valores para as três diluições tem a mesma média, ou seja, o fator diluição, estatisticamente, não interferiu na germinação da semente, pois o valor $F < F_{\text{crítico}}$ (Tabela 2 e 3).

Tabela 2: Resumo da análise de variância ANOVA (fator único) para GRS superior.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	225,644	2	112,822	2,054578	0,139999	3,204317
Dentro dos grupos	2471,061	45	54,91248			
Total	2696,705	47				

Tabela 3: Resumo da análise de variância ANOVA (fator único) para GRS inferior.

<i>Fonte da variação</i>	<i>SQ</i>	<i>gl</i>	<i>MQ</i>	<i>F</i>	<i>valor-P</i>	<i>F crítico</i>
Entre grupos	58,59068411	2	29,29534	0,111364	0,894858	3,204317
Dentro dos grupos	11837,61912	45	263,0582			
Total	11896,20981	47				

4.7 Estatística

4.7.1 Estatística descritiva

A estatística descritiva tem como objetivo básico sintetizar uma série de valores de mesma natureza.

Para testar a normalidade dos dados, usou-se o teste de Kolmogorof-Smirnov. Assim, foi construído histogramas de cada parâmetro analisado, porém serão demonstrados através da Figura 45 somente os histogramas para os valores Aeróbios Totais e através da Figura 46 os histogramas para os valores de Fungos.

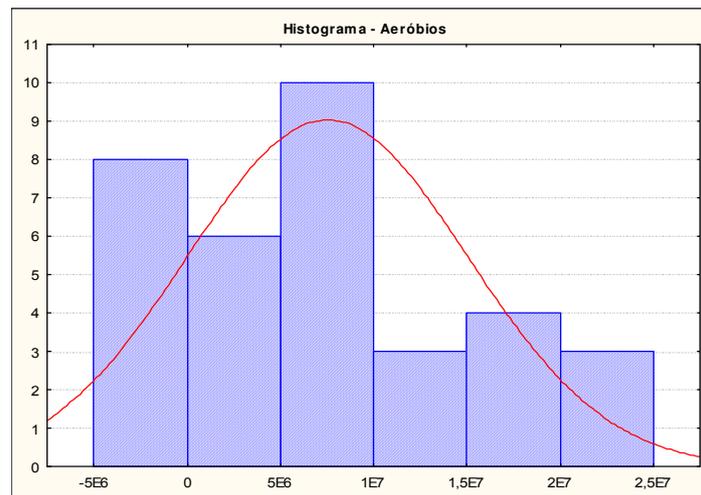


Figura 45: Histograma dos dados de aeróbios Totais

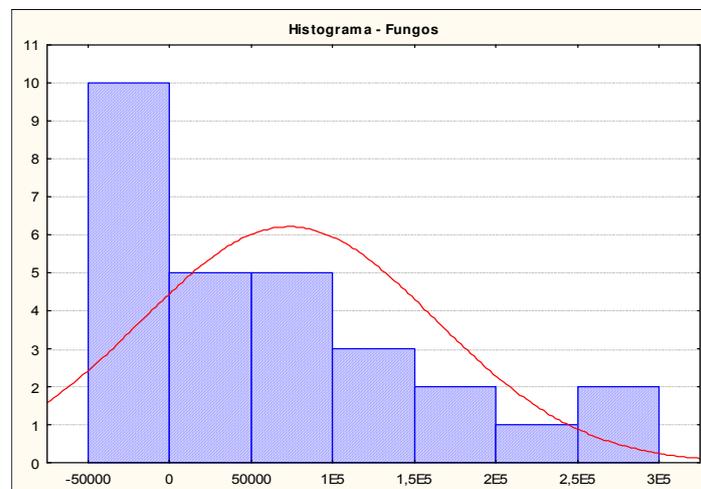


Figura 46: Histograma dos dados de Fungos

Pode-se observar que os histogramas seguem uma distribuição normal. Portanto, foi escolhido como estudo estatístico a Análise dos Componentes Principais (ACP) para verificação do comportamento dos diversos parâmetros.

4.7.2 Análise dos componentes principais (ACP)

Para o estudo da ACP foram considerados como componentes os parâmetros: aeróbios, fungos, umidade, temperatura, pH, Ferro, Cobre, Zinco, Manganês, sólidos voláteis e os teste de fitotoxicidade da semente de tomate (GRS e CRR). Será apresentada a seguir a matriz de correlação desses parâmetros para a amostra superior (Tabela 4) e inferior (Tabela 5).

Tabela 4: Matriz de correlação dos parâmetros analisados para a amostra superior

	Aeróbios	Fungos	Umidade	Temperatura	pH	Ferro	Cobre	Zinco	Magnésio	Sólidos Voláteis	GRS	CRR
Aeróbios	1											
Fungos	-0,04658	1										
Umidade	0,18526	0,283143	1									
Temperatura	0,224424	-0,39997	-0,6870076	1								
pH	-0,29241	0,236764	0,608515	-0,657436989	1							
Ferro	0,030867	-0,168	-0,5490545	0,287833354	-0,35412	1						
Cobre	-0,19286	0,006166	0,08762568	-0,42544566	0,41503	0,120125	1					
Zinco	0,027058	-0,32992	-0,5896375	0,488521879	-0,42502	0,868294	0,039482	1				
Magnésio	-0,03162	0,248441	0,03526591	-0,387187937	0,343907	0,278836	0,508396	0,107378	1			
Sólidos Voláteis	0,251139	0,104644	-0,0898201	0,309516679	-0,24412	0,091005	0,172783	0,276345	0,254119173	1		
GRS	-0,49606	0,265185	-0,0637154	-0,169963312	0,301271	0,412805	0,438186	0,402081	0,156067385	0,287130495	1	
CRR	-0,09014	0,08243	-0,0356506	-0,122797888	0,282377	0,419285	0,417846	0,211871	0,066480655	-0,361381265	0,530967	1

Tabela 5: Matriz de correlação dos parâmetros analisados para a amostra inferior.

	Aeróbios	Fungos	Umidade	Temperatura	pH	Ferro	Cobre	Zinco	Magnésio	Sólidos Voláteis	GRS	CRR
Aeróbios	1											
Fungos	0,009965	1										
Umidade	0,080868	0,569203	1									
Temperatura	0,715093	-0,23067	-0,25120936	1								
pH	0,429346	0,473839	0,59986728	-0,113301155	1							
Ferro	-0,17676	-0,64794	-0,66733175	0,001500049	-0,63512	1						
Cobre	0,18048	0,261558	0,24281263	-0,042450937	0,744447	-0,46082	1					
Zinco	-0,13496	-0,43593	-0,66023191	0,022554856	-0,43566	0,734464	-0,19958	1				
Magnésio	0,242712	0,425936	0,37060943	0,023089665	0,648313	-0,57972	0,686156	-0,26229	1			
Sólidos Voláteis	0,356016	0,415117	-0,27281189	0,509160519	0,393902	-0,6233	0,545765	-0,06783	-0,035118259	1		
GRS	-0,63426	-0,3177	-0,61717478	-0,392864655	-0,46848	0,534331	0,024474	0,596036	-0,260104146	0,111957186	1	
CRR	-0,08226	-0,18182	0,16283054	-0,163681764	0,090331	0,130846	0,032559	-0,22096	-0,315625327	-0,179853515	0,091624	1

Pode-se observar através da matriz de correlação (Tabela 4) que os parâmetros que tem maior relação entre si são o Ferro (Fe) e o Zinco (Zn), apresentado uma correlação de 86,8% para a amostra superior.

Semelhante ao apresentado na Tabela 4 observa-se através da matriz de correlação para a amostra inferior (Tabela 5) que os parâmetros que tem maior relação entre si são o Ferro (Fe) e o Zinco (Zn), apresentado uma correlação de 73,4% de seus resultados, como também nessa amostra, foram observados uma correlação entre os microrganismos aeróbios e a temperatura.

Essas correlações entre ferro e zinco indicam que com o aumento do teor de ferro, existe a tendência em aumentar o teor de zinco e vice versa, podendo ser justificado por esses dois parâmetros serem da classe dos metais, assim terem uma maior afinidade na correlação.

Já a correlação existente entre as bactérias aeróbias e a temperatura é que de acordo com Junqueira (2000), as temperaturas no interior da massa de lixo são de grande importância, principalmente no que se refere à atividade de microrganismos que promovem a degradação dos diversos componentes do lixo. Assim, os microrganismos aeróbios, devido à sua atividade exotérmica, utilizam do grau de oxigênio disponível no início do processo de aterramento para a liberação de calor durante a degradação da matéria orgânica.

Os gráficos de ACP permitem verificar como as amostras se relacionam, ou seja, o quanto são semelhantes entre si, pois a ACP fornece as ferramentas adequadas para identificar as variáveis mais importantes nesse espaço das componentes principais.

Será demonstrado através da Figura 47 o gráfico da ACP para a amostra superior e através da Figura 48 o gráfico da ACP para a amostra inferior, com objetivo de visualizar a melhor relação dos parâmetros como componentes a biodegradação.

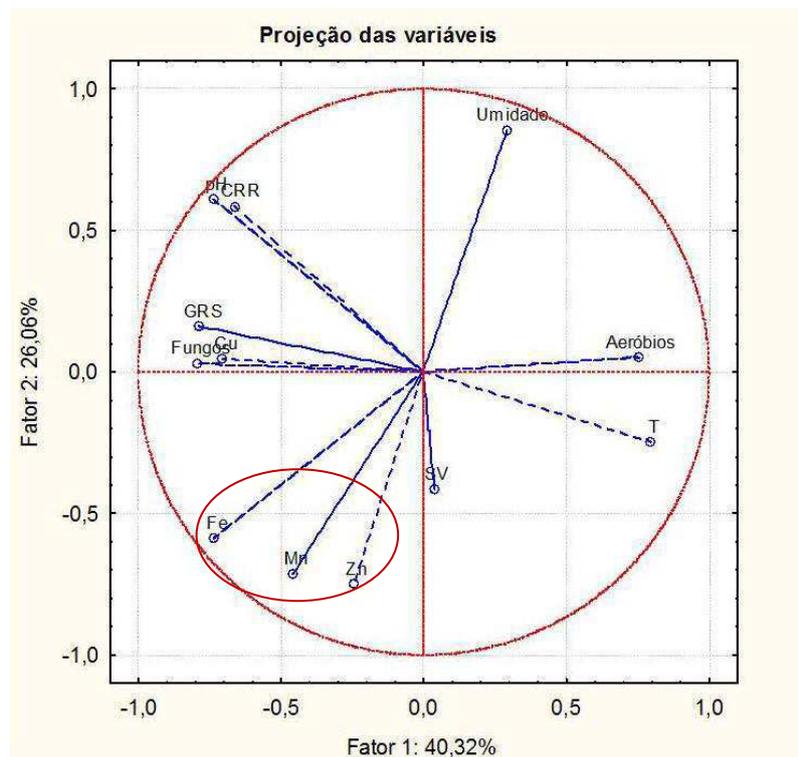


Figura 47: Análise dos componentes principais com dados da amostra superior

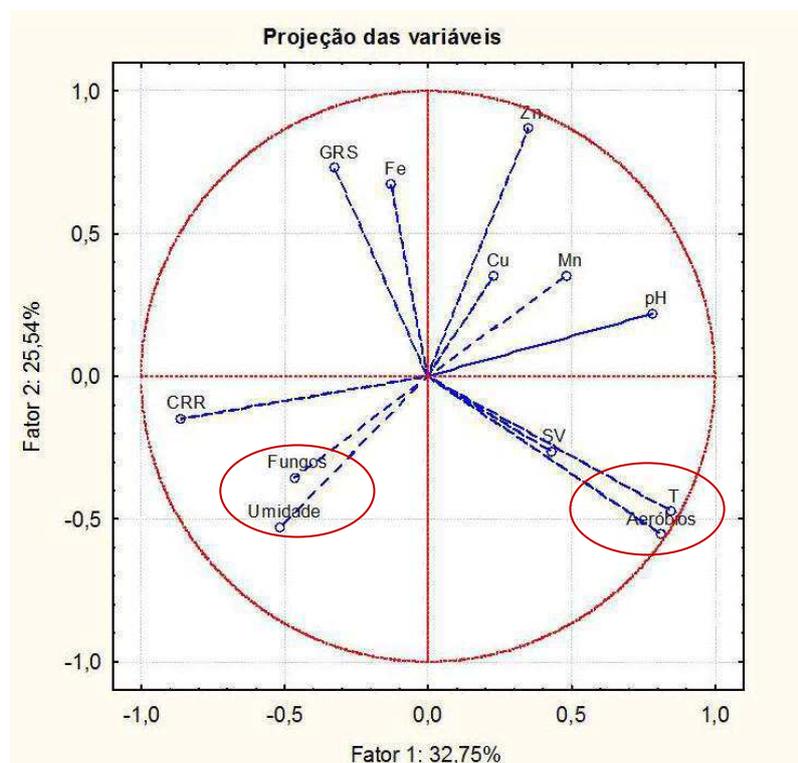


Figura 48: Análise dos componentes principais com dados da amostra inferior

Observa-se pelas Figuras 47 e 48, que a projeção de variação dos dados é de 66,4% e 58,2% dos valores analisados para amostra superior e inferior respectivamente, isso representa uma porcentagem pequena indicando que, através do gráfico ACP, os parâmetros têm uma variação muito grande de dispersão.

As Figuras 47 e 48 mostram evidências com as matrizes de correlação (Tabela 4 e 5), onde verifica-se relações diretas entre os metais, os grupo dos microrganismos aeróbios e a temperatura, como também a umidade e os fungos.

Especificamente na Figura 48, observa-se outro grupo com correlações positivas: a umidade e os fungos, onde o teor de umidade é citado como um dos principais fatores que afetam o processo de biodegradação dos resíduos, pois, segundo Monteiro (2003) os microrganismos dependem de um meio aquoso para atingir o seu pleno crescimento. Kiehl (1985) destaca também a importância da presença de água durante o processo biológico aeróbio de decomposição da matéria orgânica (compostagem) onde a umidade deve permanecer entre 40 a 60% para melhor desempenho nas atividades das bactérias decompositoras.

A pequena porcentagem na projeção de variação das Figuras 47 e 48 são consideradas baixas, pois deveriam representar no mínimo 65% dos resultados. Essa variação pode ser justificada pela heterogeneidade dos resíduos coletados, visto que as análises foram feitas através de pequenas amostras retiradas do bioreator e que poderiam não ser representativas. Supõe-se também que se os dados fossem resultados de amostras de lixiviado demonstrariam valores mais precisos do processo de biodegradação no interior do lisímetro e provavelmente a porcentagem nas projeções seriam maiores representando mais eficiência para as análises dos dados.

5. CONCLUSÕES

5.1 Principais conclusões

Neste capítulo são apresentadas algumas conclusões em relação aos objetivos da pesquisa, que envolve os principais parâmetros monitorados, destacando que essas conclusões são restritas a esse estudo e ao período de monitoramento considerado neste trabalho.

- A temperatura interna no lisímetro oscilou de acordo com a literatura técnica, no entanto houve interferência da temperatura ambiente média. Apesar disso, manteve-se dentro da variação considerada ótima para o processo de degradação em aterros, pois possibilita o desenvolvimento dos microrganismos;

- A umidade inicialmente encontrou-se dentro dos padrões para resíduos sólidos frescos e a variação desse parâmetro no decorrer do período de monitoramento se manteve favorável ao processo de bioestabilização da fração orgânica dos resíduos aterrados. Os valores finais foram mais altos comparados com os iniciais haja vista a quantidade de matéria orgânica no interior do lisímetro que tem alta capacidade de retenção de líquidos;

- A amostra superior de resíduos coletados no lisímetro apresentou a fase ácida bastante curta, sugerindo o início da fase metanogênica após os 50 dias de monitoramento;

- Para amostra inferior de resíduos coletados no lisímetro observou-se através da variação do pH o provável desenvolvimento das fases acidogênicas, acetogênicas e metanogênicas, com valores ácidos para os primeiros períodos de degradação e posteriormente valores neutros e alcalinos;

- Houve uma redução significativa nos teores de sólidos voláteis para amostra superior sugerindo que o processo de degradação tenha sido mais rápido nesta referida amostra;

- Os resultados das análises de DBO, DQO e sólidos voláteis indicaram uma redução considerável da carga orgânica desses resíduos em função do tempo de aterramento;

- As concentrações de micronutrientes (cobre, ferro, manganês e zinco) foram similares aos valores demonstrados pela literatura técnica, no entanto sua toxidez não influenciou no crescimento dos microrganismos;

- Os valores NMP do grupo coliformes corroboram com as reduções nos valores de DBO, DQO e matéria orgânica.

- Nos ensaios de quantificação de aeróbios totais e fungos observou-se uma pequena variação na contagem desses microrganismos, onde a amostra inferior (ambiente mais anaeróbio) sofreu interferência da precipitação, onde a concentração de oxigênio possivelmente desfavoreceu ao crescimento desses microrganismos.

- A simples quantificação de microrganismos sejam eles expressos em NMP ou UFC, embora contribuam para o estabelecimento de padrões ou faixas de variação em aterros, não esclarece significativamente acerca da evolução do processo e estabelecimento das fases de degradação. Nesse aspecto, é mais importante concentrar esforços no sentido de quantificar os produtos metabólicos intermediários e finais do processo. As maiores dificuldades da interpretação de valores da densidade microbiana, certamente, reside no fato de que muitas espécies têm a capacidade de formar esporos que podem sobreviver por muito tempo, em condições adversas e, também, na limitação dos meios de cultura empregados;

- Embora os metais possam ter influência no processo biodegradativo, não se observou evidências que pudessem afetar a contagem de microrganismos durante o período do monitoramento, pois a elevação do pH possivelmente contribuiu para menor concentração de toxicidade do meio.

- A análise multivariada em componentes principais (ACP) relaciona a biodegradação principalmente com a presença dos microrganismos aeróbios e os fungos, que apresentaram um desenvolvimento microbiano na massa de lixo, onde a temperatura e a umidade interferem nessa atividade.

5.2 Sugestões para pesquisas futuras

Com base no estudo desenvolvido nesta pesquisa e levando-se em conta as dificuldades e necessidades que surgiram, algumas sugestões para futuras pesquisas são formuladas:

- Avaliar a camada de cobertura quanto a infiltração de líquidos a fim de relacioná-la a eficiência da degradabilidade da matéria orgânica;

- Monitorar nos aterros simulados o processo de digestão anaeróbia, denotado pela medição de concentrações de metano;

- Adaptar nas células experimentais, um sistema de isolamento térmico eficiente para reduzir, ao mínimo, a influência do meio externo na temperatura interna do lisímetro.

6. REFERÊNCIAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas): NBR 8.149. Apresentação de Aterros Sanitários de Resíduos Sólidos Urbanos. 1992.

_____. **NBR 10.004**. Resíduos Sólidos – Classificação. 30/11/2004.

_____. **NBR 10.007**. Resíduos Sólidos – Amostragem de Resíduos. 2004.

_____. **NBR 13.896/1997**. Aterros de resíduos não perigosos – Critérios para projetos, implantação e operação .

Agência Nacional de Vigilância Sanitária **Descrição dos Meios de Cultura Empregados nos Exames Microbiológicos (Módulo IV)**. 2004. Disponível em: http://www.anvisa.gov.br/servicosaude/manuais/microbiologia/mod_4_2004.pdf. Acesso em: outubro de 2008.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da Influência da Composição de Resíduos Sólidos Urbanos no Comportamento de Aterros Simulados**. Tese de Doutorado. UFPE. 2007.

APHA. American Public Health Association. **Standard Methods for the Examinations of Water and Wastewater**. 1998. Washington, DC.

BARBOSA, H. R.; TORRES, B. B. **Nutrição e Metabolismo Bacteriano**. 1999. In: Trablusi, L. R. Altherthum; F. Gompertz, O.F.; Candeias J. A. N (eds). Microbiologia. 3 ed, Atheneu. São Paulo. Cap 3.

BARLAZ M.A.; SCHAEFER D.M.; HAM R.K. **Bacterial population development and chemical characteristics of refuse decomposition in a simulated sanitary landfill**. Applied Environmental Microbiology. London, v.55, p.55-65. 1989.

BIDONE, F. R. A ., POVINELLI, J. **Conceitos básicos de resíduos sólidos**. 1999. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP.

BORGLIN, S. E; HAZEN, T. C.; OLDENBURG, C. M.; ZAWISLANSKI, P. T. **Comparison of Aerobic and Anaerobic Biotreatment of Municipal Solid Waste**. J.Air & Waste Manage. Assoc. V. 54, p. 815–822. 2004.

CARVALHO, M. F. **Comportamento mecânico de resíduos sólidos urbanos**. Tese de doutorado. Universidade de São Paulo. 1999.

CASTILHOS JR. A. B. (Coordenador), 2003. **Resíduos sólidos urbanos: Aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Projeto PROSAB - RIMA, ABES. Rio de Janeiro. 294p.

CATAPRETA, C.A.A. **Comportamento de um aterro sanitário experimental: avaliação da influência do projeto, construção e operação**. Tese de doutorado. UFMG. 2008.

CONAMA. **Conselho Nacional do Meio Ambiente**. Resolução 274/2000.

COSTA NETO, P. L. O. **Estatística**. São Paulo: Edgard Blucher, 1978. 264p.

FARIA, F. S. (2002). **Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos Urbanos**. Engenharia civil. Rio de Janeiro, UFRJ.

FERREIRA, M. A. S., 2006. **Aplicação de modelos de avaliação qualitativa e quantitativa dos percolados gerados em um aterro sanitário**. Rio de Janeiro, UFRJ. Dissertação de Mestrado.

FIGUEIREDO, P. J. M. **A Sociedade do Lixo: os resíduos a questão energética e a crise ambiental**. 2 ed. Piracicaba: Unimep, 1995. 240 p.

FRAZIER, W. C.; WESTHOFF, D.C. **Microbiologia de los alimentos**. 4. Ed. Zaragoza, Espanha: Acribia, 1993. 539p.

FUNASA. Fundação Nacional de Saúde. **Manual Prático de análise de água**. 2006. 2 ed. Brasília – DF.

GADELHA, E. P., 2005. **Avaliação de inóculos Metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica de Resíduos sólidos urbanos**. Brasília – DF, UnB. Dissertação de Mestrado.

GALVÍNCIO, J. D. & RIBEIRO, J. G. **Precipitação média anual e a captação de água de chuva no Estado da Paraíba**. 5º Simpósio Brasileiro de Captação e Manejo de Água da Chuva. Teresina – PI. 2005.

GERBA, C. P. Microbial pathogens in municipal solid waste. In: PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M. A. (eds.) *Microbiology of solid waster*. New York: CRC Press, 1996.

HENRIQUE, F. A. N. **Estimativa da evapotranspiração de referência em Campina Grande-PB**. Dissertação de Mestrado. UFCG. 2006.

HIRSCH, A. K.; VERA, R. A.; BRIONES, M. E. **Estudio a escala de laboratorio para la determinación de los parámetros hidrológicos óptimos para la generación de metano en rellenos sanitarios en Chile**. 2002. Universidad Católica de Valparaíso. Escuela de Ingeniería en Construcción.

HOUAISS, A. (2001). **Dicionário de Língua Portuguesa**. Editora Objetiva Ltda.

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (2000)**. IBGE, Diretoria de Pesquisas, Departamento de População e Indicadores Sociais.

JAMES, Bárbara. **Lixo e Reciclagem**. São Paulo, Scipione, 1997. 43p.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil: situação atual e perspectivas**. 10º SILUBESA – Simpósio Luso Brasileiro de Engenharia Sanitária. 2002.

JUNQUEIRA, F. F. **Análise do Comportamento de Resíduos Urbanos e Sistemas Dreno Filtrantes em Diferentes Escalas, com Referência ao Aterro do Jóquei Clube – DF**. Tese de Doutorado, Universidade de Brasília. 2000.

_____. **Monitoramento do comportamento de lixo em células geotecnicamente preparadas**. 1999. 4º Congresso Brasileiro de Geotécnica Ambiental.

KAPAZ, E. (2001). “Política Nacional de Resíduos – Relatório Preliminar.”

KIEHL, E. J. **Fertilizantes Orgânicos**. Piracicaba. 1985.

KYAW, C.M. **Crescimento bacteriano**. Disponível em: <http://www.unb.br/ib/cel/microbiologia/index.html>. Acesso em: dezembro de 2008.

KNOCHENMUS, G.; WOJNAROWICZ, M. e VAN IMPE-W. F. **Stability of Municipal Solid Wastes**. 1998. In: Proc. of the Third International Congress on Environmental Geotechnics. Lisboa. Portugal.

LAWRENCE, A. W.; McCARTY, P. L. **The Role of Sulfide in Preventing Heavy Metal Toxicity in Anaerobic Treatment**. 1965. J. WPCF, V 37.

LEITE, H. E. A. S. **Estudo do comportamento de aterros de RSU em um bioreator em escala experimental na cidade de Campina Grande - Paraíba**. Dissertação de Mestrado. UFCG. 2008.

_____; NÓBREGA, F.F.; MONTEIRO, V.E.D.; MELLO, M.C.A.; PAIVA, W. **Uma proposta de instrumentação para monitoramento de aterros sanitários em escala experimental.** COBRAMSEG – Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia Geotécnica. 2008.

_____; VIEIRA NETO, J.M.; MONTEIRO, V.E.D. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do município de Campina Grande – PB.** SILUBESA – Simpósio Luso-brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2008.

LEITE, V. D. **Origem e composição dos Resíduos Sólidos.** Trabalho Monográfico apresentado para obtenção do título de professor titular da UEPB. Campina Grande. 1998.

LIMA, L.M.Q. **Estudo da influência de reciclagem de chorume na aceleração da metanogênese em aterro sanitário.** Tese de doutorado. EESC/USP. 1988.

_____; NUNES, C.R. **Aterro Sanitário Celular.** 1994

LINS, M.C.M. **Avaliação Microbiológica e Fitotóxica do Chorume da Estação de Tratamento do Aterro da Muribeca – PE.** Dissertação de Mestrado. UFPE. 2005.

MADIGAN, M.T.; MARTINKO, J.M.; PARKER, J. **Brock Biology of Microorganisms.** 10 Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall. 2002.

MARIANO, M.O.H.; JUCÁ, J.F.T. **Monitoramento de recalques no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** 1998. pp. 1671–1678. Anais do XI Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações, Brasília, vol.3.

MELO, M.C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca.** Dissertação de Mestrado, UFPE, 2003.

_____; MONTEIRO, V.E.D.; NEVES, M.L.; ARAÚJO, J.M. & JUCÁ, J.F.T. **Estudos de Toxicidade em Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos.** Revista Biotecnologia. Ano V, Setembro/Outubro 2002.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises Físicas, Químicas e Biológicas no Estudo do Comportamento de Aterro da Muribeca.** Tese de Doutorado. UFPE. 2003.

_____; JUCÁ, J.F.T., RÊGO, C.C. **Influência das Condições Climáticas no Comportamento do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca.** 2001. 21^º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa – PB.

_____; MELO, M.C.; ALCÂNTARA, P.B.; ARAÚJO, J.M.; ALVES, I.R.F.S.; JUCÁ, J.F.T. **Estudo do comportamento de RSU em uma célula experimental e suas correlações com aspectos microbiológicos, físicos e químicos**. 2006, pp 223-230. Artigo Técnico In: Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. v.II. Nº3 – Jul/set.

_____; JUCÁ, J.F.T., RÊGO, C.C. **Influência das Condições Climáticas no Comportamento do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca**. 2001. 21º Congresso de Engenharia Sanitária e Ambiental. João Pessoa – PB.

OLIVEIRA, L. C. **Digestão anaeróbia: uma visão sustentável no tratamento dos subprodutos de origem animal**. Tese do Departamento de Ciências Agrárias – Universidade dos Açores. 2005.

PAES, R. F. C. **Caracterização do Chorume produzido no Aterro da Muribeca-PE**. 2003. 150 p. Dissertação de Mestrado, UFCG – CG.

PAIVA, W. **Aplicação da estatística para descrever o comportamento de um solo expansivo**. Tese de doutorado. UFPE. 2009.

PALMA, J. H. G.; VALENZUELA, P. I. T.; ESPINACE, R. H. A. **Redución de los Tiempos de Estabilización en Rellenos Sanitarios Operados con Recirculación de Lixiviados Tratados**. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. 2000.

PALMISANO, A. C.; BARLAZ, M.A, **Microbiology of Solid Waste**. 1996. pp.1-224. In Anna C. Palmisano, Morton A. Barlaz (eds).

PELCZAR JR., M. J.; CHAN, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia; conceitos e aplicações**. 1997. ed. São Paulo: Pearson Makron Books, V. 1, 2.

PELCZAR JR, M. J. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 1996. Volume II, 2ª ed. São Paulo: Makron Books.

_____; CHANG, E. C. S.; KRIEG, N. R. **Microbiologia: conceitos e aplicações**. 2. Ed. São Paulo: Makron Books, 1996. V.2.

PEREIRA NETO, J. T. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos em Municípios de Pequeno Porte**. Revista Ciência e Ambiente, número 18, Santa Maria-RS, 1999. 42-52p.

PFEFFER, J. T. **Reclamation of energy from organic refuse**. NSF RANN, Report No. 231-176. 1973.

- SENIOR, E.; BALBA, M. T. M. **Landfill biotechnology: bioenvironmental systems**. Boca Raton, FL.: CRC press, 1987.
- SILVA, F. V. B., 2005. **Avaliação da influência da correção do teor de umidade na degradação anaeróbia de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais. 150p.
- SILVA, N. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos**. Valéria Christina Amstalden - São Paulo : Livraria Varela,1997, p31.
- SILVA, V. G. **Monitoramento de parâmetros físico, químicos e biológicos em um reator anaeróbio híbrido (RAH) em escala piloto, tratando água residuária do café produzido por via úmida**. Dissertação de mestrado. UFLA. 2007.
- SIMÕES, G. F. **Modelo para avaliação de recalques em aterros de disposição de resíduos sólidos urbanos**. 2000. Tese (Doutorado). Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.
- SILVEIRA, A. M. M.. **Estudo do Peso Específico de RSU**. Tese de Doutorado, UFRJ, 2004.
- SRINIVASAN, S. V.; JAYANTHI, S.; SUNDARAJAN, R. **Synergistic effect of Kichen refuse anda Domestic sewage in Biogas production**. In: NATIONAL SEMINAR ON ANAEROBIC TECHNOLOGIES FOR WASTE TREATMENT, MADRAS. India, 1997 p.87-91.
- SISINO, C. L. S. **Estudo Preliminar da Construção Ambiental em Aérea de Influência do Aterro Controlado do Morro do Céu – Niterói RJ**. 1995. Dissertação (Mestrado). FIOCRUZ.
- TAM, N.F.Y. & TIQUIA, S.M. **Elimination of Phitotoxicity During Co-composting of Spent Pig-manure Sawdust Litter and Pig Sludge**. Bioresource Technology. 1994.
- TCHOBANOGLIOUS, G., THEISEN, H., VINIL, S. **Integrated solid waste management: engineering principles and management issues**. New York: Irwin MacGraw-Hill, 1993. 978 p.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.L.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H.; VOLKWEIISS, S.J. **Análises de Solo, Plantas e Outros Materiais**. UFRGS. 1995.

TÍQUIA, S.M.; N.F.Y & HODGKISS, I.J. **Effects of Composting on Phytotoxicity of Spent Pig-manure Sawdust Litter**. 1996. Hong Kong.

TORTORA, G. J.; FUNKE, B. R.; CASE, C. L. **Microbiologia**. 2000. Editora Artimed. 6° ed. Porto Alegre – RS.

TRABULSI, L. R. et al. **Microbiologia**. 2005. 4 ed. São Paulo.

UFSC. Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos. Grupo de processos biotecnológicos. **Fungos**. Disponível em: http://enq.ufsc.br/labs/probio/disc_eng_bioq/trabalhos_pos2003/const_microorg/fungos.htm. Acesso em: Dezembro de 2008.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (USEPA). **Municipal solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2005**. Washington, U. S. EPA, October 2006.

VAZOLLER, R. F. **Biodiversidade: perspectivas e oportunidades tecnológicas**. 2001. Microbiologia e Saneamento Ambiental. USP. São Paulo.

WANG, W. & KETURI, P.H. **Comparative Seed Germination Tests Using Ten Plant Species for Toxicity Assessment of a Metal Engraving Effluent Sample**. Wat. Air Soil Pollut. 1990.

WHO. International Reference Center for Wastes Disposal. **Methods of analysis of sewage sludge solid wastes and compost**. 1979. Switzerland.

WIKIPÉDIA – dicionário *on line*. **Estatística**. Acessado em 01/2009. Disponível em: <http://pt.wikipedia.org/wiki/Estatística>.

7. ANEXO

Anexo 1: Tabela de Hoskins – índice do Número Mais Provável (NMP) e limites de confiança de 95% para os resultados positivos da técnica dos tubos múltiplos para série de 3 tubos.

Número de tubos com reação positiva, em séries de 3 tubos			Índice de NNP por 100mL da amostra	Limites de confiança de 95%	
10ml	1ml	0,1ml		Inferior	superior
0	0	0	< 3	–	–
0	0	1	3	< 0,5	9
0	1	0	3	< 0,5	13
1	0	0	4	< 0,5	20
1	0	1	7	1	21
1	1	0	7	1	23
1	1	1	11	3	36
1	2	0	11	3	36
2	0	0	9	1	36
2	0	1	14	3	37
2	1	0	15	3	44
2	1	1	20	7	89
2	2	0	21	4	47
2	2	1	28	10	150
3	0	0	23	4	120
3	0	1	39	7	130
3	0	2	64	15	380
3	1	0	43	7	210
3	1	1	75	14	230
3	1	2	120	30	380
3	2	0	93	15	380
3	2	1	150	30	440
3	2	2	210	35	470
3	3	0	240	36	1300
3	3	1	460	71	2400
3	3	2	1100	150	4800
3	3	3	≥ 2400	–	–

Referência: Standard Methods for Examination of Water and waster Water, 1971.