



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL**  
**MESTRADO EM SANEAMENTO AMBIENTAL**

**FRANCISCO AMÍLCAR MOREIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE LISÍMETROS PREENCHIDOS COM  
RESÍDUOS SÓLIDOS COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**

**FORTALEZA**

**2015**

**FRANCISCO AMÍLCAR MOREIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE LISÍMETROS PREENCHIDOS COM  
RESÍDUOS SÓLIDOS COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração em Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos  
Mota

**FORTALEZA**

**2015**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

- 
- M837a      Moreira Junior, Francisco Amilcar.  
Avaliação do comportamento de Lisímetros preenchidos com resíduos sólidos com diferentes características / Francisco Amilcar Moreira Junior. – 2015.  
102 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Saneamento Ambiental, Fortaleza, 2015.  
Área de Concentração: Saneamento Ambiental.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota.
1. Saneamento. 2. Resíduos sólidos. 3. Aterro sanitário. 4. Biogás - Aproveitamento. I. Título.

**FRANCISCO AMÍLCAR MOREIRA JUNIOR**

**AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE LISÍMETROS PREENCHIDOS COM  
RESÍDUOS SÓLIDOS COM DIFERENTES CARACTERÍSTICAS**

Dissertação submetida à coordenação do curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil, na área de concentração em Saneamento Ambiental da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em 02/02/15:



Prof. Dr. Francisco Suetônio Bastos Mota (Orientador)

Universidade Federal do Ceará – UFC



. Ronaldo Stefanutti (Examinador Interno)

Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Dr. Pedro Henrique Augusto Medeiros (Examinador Externo)

Instituto Federal do Ceará – IFCE

As crianças, simplesmente, o mais belo testemunho de Deus e os maiores sábios da humanidade.

Confia ao Senhor a tua sorte, espera nele e ele agirá. (Salmo 36, 5).

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu melhor e maior amigo, JESUS, por estar ao meu lado em tudo na vida;

A Eveline Teixeira (noiva e futura esposa), minha eterna companheira, por ser um canal de amor entre mim e Deus, assim como, o meu porto seguro;

Aos meus pais por não terem medidos esforços em me dar educação, carinho, conselhos, alegrias, proteção e amor;

Aos meus sobrinhos, três anjinhos de Deus, que me ensinaram muito com as suas purezas e me deixaram sentir inúmeras vezes o quanto é belo ser criança;

As crianças de todo o mundo, pois serão sempre a fonte em que irei retirar os melhores e mais belos ensinamentos;

Aos meus irmãos, pelo apoio nas dificuldades e por todos os momentos em que contei com as suas proteções e carinhos;

Ao professor Suetônio Mota, pela paciência, carinho, conselho, orientação e, acima de tudo, pela amizade;

Aos professores do DEHA, Marisete, Raimundo, André, Capelo, Ronaldo Nascimento, Ronaldo Stefanutti, pela graça do conhecimento e pela amizade;

Aos meus amigos de pesquisa e de laboratório, pela ajuda em todos os momentos e pelo companheirismo;

Aos professores do IFCE, Adeildo e Najila, que não mediram esforços em me ajudar e incentivar em todos os momentos difíceis e ao professor Pedro por sua imensurável contribuição a dissertação;

A todos do sistema de gestão e gerenciamento de resíduos sólidos de Fortaleza (ACFOR, ECOFOR) e especialmente os que trabalham no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – ASMOC;

A CAPES pelo apoio e incentivo ao estudo em nível de pós graduação;

A FINEP pelo incentivo na pesquisa pelo auxílio na aquisição de equipamentos;

Aos colegas de mestrado, pelos momentos vividos;

## RESUMO

Esta pesquisa teve como objetivo avaliar o comportamento da massa de resíduos sólidos em termos de produção de lixiviado, geração de gases, avaliação das propriedades físico químicas do efluente, caracterização dos resíduos e recalque, para três lisímetros em uma área pertencente ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia – CE. A pesquisa foi realizada durante os meses de janeiro a junho de 2014, dando continuidade ao monitoramento e caracterização das propriedades que ocorriam internamente aos Lisímetros desde a sua implantação em maio de 2012. Foram utilizados, para a avaliação, três Lisímetros: L01 - preenchido com 100% de resíduos na forma como chegam ao aterro sanitário; L02 – preenchido com 50% de resíduos orgânicos e 50% como chegam ao aterro sanitário; L03- preenchido 100% com resíduos orgânicos. Durante o período da pesquisa foi realizado um levantamento das precipitações ocorridas no município pertencente ao aterro sanitário, de forma a verificar a possível interferência desta na geração dos gases e produção de efluentes. Como resultado foi observado a consistência na produção de biogás, principalmente nos valores observados para metano na base dos lisímetros, de forma mais intensa, no L03, assim como a grande geração de lixiviado, com o inconveniente do odor produzido pelo gás sulfídrico. Por já se encontrarem há aproximadamente dois anos em operação, foram verificados altos valores de recalque dos resíduos, sendo alcançada a média de 92 cm para o L01, 130,5 cm para o L02 e de 123,75 cm para o L03. Em termos de produção de metano, os valores médios obtidos foram de 0,726% e 0,667 % para a base e o meio do L01, de 2,81% e 0,69% na base e no meio do L02, e de 4,8% e 1,966% no entorno da base e do meio do L03. Para os valores de dióxido de carbono os valores alcançados, em média, para a base e o meio dos Lisímetros foram de 2,041% e 0,132% no L01, 3,28% e 0,4% no L02 e 7,8% e 2,778% no L03. Já quanto ao gás sulfídrico, foram obtidos os valores de 0,866 ppm e 0,917 ppm para o L01, de 5,14 ppm e 0,87 ppm para o L02, e de 164,2 ppm e 4,377 ppm na base e no meio do L03, respectivamente. Em termos das características físico-químicas do lixiviado, foram encontradas variações para determinados parâmetros, principalmente durante os meses de maiores índices de chuvas, afetando, desta forma, as características da massa de resíduos, na atividade dos microrganismos e na geração do efluente, o qual se apresentou com valores bem acima do permitido em legislação específica para o lançamento em corpos hídricos. Mesmo com a presença de adversidades, como o recalque excessivo, forte produção de líquidos, dois anos em decomposição, e de fissuras na camada de cobertura, foi constatada, ainda, uma boa produção de gases, indicando a viabilidade e a importância de se investir em técnicas de aproveitamento de biogás em aterros sanitários.

**Palavras-chave:** Resíduos Sólidos. Aterro Sanitário. Lisímetro. Aproveitamento do Biogás.

## ABSTRACT

This research aimed to evaluate the behavior of the mass of solid waste in terms of leachate production, gas generation, evaluation of the physicochemical properties of the effluent, waste characterization and discharge for three lysimeters in an area belonging to the Landfill Metropolitan West Caucaia - CE. The survey was conducted during the months from January to June 2014, continuing the monitoring and characterization of the properties occurring internally to lysimeters since its inception in May 2012. It was used to evaluate three lysimeters: L01 - filled with 100% of waste in the way reach the landfill; L02 - filled with 50% of organic waste and 50% as they arrive to the landfill; L03- 100% filled with organic waste. During the research period was a survey of rain in the city belonging to the landfill in order to verify the possible interference in the generation of gases and waste production. As a result was observed consistency in the production of biogas, especially in the observed values of methane at the base of the lysimeters, more intensely, the L03, as well as the great generation of leachate, with the drawback of odor produced by hydrogen sulfide gas. As they were already there about two years in operation were high discharge values of waste, and achieved an average of 92 cm for the L01, 130.5 cm to L02 and 123.75 cm for the L03. In terms of methane production, the values obtained were 0.726% and 0.667% for the base and the middle of L01, 2.81% and 0.69% at the base and in the middle of L02, and 4.8 % and 1,966% in the vicinity of the base and the middle of the L03. For carbon dioxide the values obtained, on average, to the base of the lysimeters and the middle was 2.041% and 0.132% in the L01, and 3.28% to 0.4% and 7.8% and L02 2,778 % in the L03. As for the hydrogen sulfide was obtained values of 0.866 ppm and 0.917 ppm for L01, 5.14 ppm and 0.87 ppm for L02, and 164.2 ppm to 4,377 ppm at the bottom and in the middle of L03 respectively. In terms of physical and chemical characteristics of the leachate, variations were found for certain parameters, especially during the months of highest rates of rainfall, affecting in this way, the waste mass characteristics, the activity of microorganisms and the effluent generation, which performed with values well above the permitted in specific legislation for the release in water bodies. Even with the presence of adversity, such as excessive repression, strong production of liquid two years to decompose, and cracks in the cover layer, was found also a good gas production, indicating the viability and importance of investing in biogas production technologies in landfills.

Keywords: Solid Waste. Landfill. Lysimeters. Reuse of Biogas



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 01:</b> Fases de degradação dos resíduos sólidos. ....	22
<b>Figura 02:</b> Imagem de satélite da área do asmoc. ....	29
<b>Figura 03:</b> Vista da área de acesso ao asmoc. ....	30
<b>Figura 04</b> - Vista geral dos lisímetros utilizados na pesquisa. ....	31
<b>Figura 05</b> - Voncentrações de materiais em cada lisímetro. ....	32
<b>Figura 06</b> - Preenchimento dos lisímetros. ....	34
<b>Figura 07</b> – Precipitações mensais no período da pesquisa. caucaia, ceará, 2014. ....	35
<b>Figura 08</b> – Maiores precipitações diárias por mês, na área da pesquisa. caucaia, ceará, 2014. .....	35
<b>Figura 09</b> - Coleta de lixiviado na base dos lisímetros. ....	36
<b>Figura 10</b> - Amostra de lixiviados coletados nas bases dos lisímetros. ....	37
<b>Figura 11</b> - Amostras de lixiviados coletados nos lisímetros 03 e 02. ....	37
<b>Figura 12</b> - Local de coleta de massa de resíduos nos lisímetros. ....	39
<b>Figura 13</b> - Tubulação utilizada para a coleta da massa de resíduos. ....	40
<b>Figura 14</b> - Amostra da massa de resíduo coletada no lisímetro 03 em 10/03/2014. ....	40
<b>Figura 15</b> - Pesagem das amostras de massas de resíduos para caracterização físico-química. .....	41
<b>Figura 16</b> - Diluição da massa de resíduos para a caracterização físico-química. ....	41
<b>Figura 17</b> - Trado utilizado para a coleta da massa de resíduo através do topo dos lisímetros. .....	42
<b>Figura 18</b> - Remoção da camada superior, pelo trado, para a coleta da massa de resíduos. ....	42
<b>Figura 19</b> - Detalhe da abertura para a coleta da massa de resíduos. ....	43
<b>Figura 20</b> - Detalhe das massas de resíduos coletadas. ....	43
<b>Figura 21</b> – Amostras de massas de resíduos, após a diluição. ....	44
<b>Figura 22</b> - Medição do recalque da massa de lixo nos lisímetros. ....	44
<b>Figura 23</b> - Detalhe da utilização do equipamento de medição da composição dos gases. ....	45
<b>Figura 24:</b> Detalhe da conexão do equipamento aos lisímetros. ....	46
<b>Figura 25</b> - Medição dos gases no bocal de saída acima da camada de cobertura nos lisímetros. ....	48
<b>Figura 26</b> - Cor aparente nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano 2014. ....	51

<b>Figura 27</b> - Turbidez dos lixiviados nos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>53</b>
<b>Figura 28</b> - Valores de ph nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>54</b>
<b>Figura 29</b> - Valores de alcalinidade nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>56</b>
<b>Figura 30</b> - Valores de cloretos nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>58</b>
<b>Figura 31</b> - Valores de dco nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>59</b>
<b>Figura 32</b> - Valores de fósforo nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>61</b>
<b>Figura 33</b> - Valores de amônia nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>63</b>
<b>Figura 34</b> - Valores de nitrito nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>63</b>
<b>Figura 35</b> - Valores de nitrato nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>64</b>
<b>Figura 36</b> - Valores de sólidos totais nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ...	<b>68</b>
<b>Figura 37</b> - Valores de sólidos voláteis nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. .....	<b>68</b>
<b>Figura 38</b> - Valores de sólidos fixos nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>69</b>
<b>Figura 39</b> - Valores de coliformes totais nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. .....	<b>71</b>
<b>Figura 40</b> - Valores de e. coli nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014. ....	<b>72</b>
<b>Figura 41</b> - Composição do biogás na base do lisímetro 01 no ano de 2014. ....	<b>74</b>
<b>Figura 42</b> - Composição do biogás no meio do lisímetro 01 no ano de 2014. ....	<b>75</b>
<b>Figura 43</b> - Composição do biogás na base do lisímetro 02 no ano de 2014. ....	<b>78</b>
<b>Figura 44</b> - Composição do biogás no meio do lisímetro 02 no ano de 2014. ....	<b>79</b>
<b>Figura 45</b> - Composição do biogás na base do lisímetro 03 no ano de 2014. ....	<b>82</b>
<b>Figura 46</b> - Composição do biogás no meio do lisímetro 03 no ano de 2014. ....	<b>83</b>
<b>Figura 47</b> - Composição do biogás no topo dos lisímetros no ano de 2014. ....	<b>86</b>
<b>Figura 48</b> - Teores de sólidos (mg/l) na massa de resíduos em junho de 2014. ....	<b>88</b>
<b>Figura 49</b> - Compostos nitrogenados na massa de resíduos dos três lisímetros, em junho de 2014. ....	<b>90</b>
<b>Figura 50</b> - Teores de umidade (%) na massa de resíduos nos lisímetros, em junho de 2014. ....	<b>91</b>
<b>Figura 51</b> - Recalque da massa de resíduos no período de monitoramento dos lisímetros no ano de 2014. ....	<b>92</b>
<b>Figura 52</b> - Indicação de um local de maior rebaixamento da massa de resíduos. ....	<b>93</b>

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 01</b> - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2012. ....	<b>18</b>
<b>Tabela 02</b> - Composição do biogás de aterro sanitário. ....	<b>21</b>
<b>Tabela 03</b> - Fases de degradação dos resíduos sólidos em um aterro sanitário. ....	<b>25</b>
<b>Tabela 04</b> - Fatores que contribuem para a geração de biogás em aterros sanitários. ....	<b>23</b>
<b>Tabela 05</b> - Distribuição, por setores, da área pertencente ao Asmoc. ....	<b>30</b>
<b>Tabela 06</b> - Quantidades de resíduos, em toneladas, destinadas ao Asmoc em 2013. ....	<b>31</b>
<b>Tabela 07</b> - Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos destinados ao aterro sanitário de Caucaia, Ceará, maio/2012. ....	<b>33</b>
<b>Tabela 08</b> - Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos e respectivas metodologias de análise. ....	<b>38</b>
<b>Tabela 09</b> - Parâmetros físico-químicos e metodologias de análise da massa de resíduos. ....	<b>39</b>
<b>Tabela 10</b> - Detalhe da sistemática de medição dos gases nos lisímetros. ....	<b>46</b>
<b>Tabela 11</b> - Resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas do lixiviado gerado nos lisímetros L02 e L03. L01. ....	<b>50</b>
<b>Tabela 12</b> - Descrição dos valores da Figura 41 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>75</b>
<b>Tabela 13</b> - Descrição dos valores da Figura 42 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>76</b>
<b>Tabela 14</b> - Descrição dos valores da Figura 43 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>79</b>
<b>Tabela 15</b> - Descrição dos valores da Figura 44 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>80</b>
<b>Tabela 16</b> - Descrição dos valores da Figura 45 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>83</b>
<b>Tabela 17</b> - Descrição dos valores da Figura 46 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura. ....	<b>84</b>
<b>Tabela 18</b> – Características da massa de resíduos dos lisímetros no de 2014. ....	<b>88</b>

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS**

ABES – Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRELP - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública

ANVISA – Agência Nacional de Vigilância Sanitária

ASMOC - Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia

CEMPRE – Compromisso Empresarial para Reciclagem

CH<sub>4</sub> - Gás Metano

CO<sub>2</sub> - Dióxido de Carbono

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DQO - Demanda Química de Oxigênio

DEHA – Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental

EPI – Equipamento de Proteção Individual

FEAM – Fundação Estadual do Meio Ambiente

FUNCEME - Fundação Cearense de Metrologia e Recursos Hídricos

GEE – Gases de Efeito Estufa

GEM5000 - Gas Analyzer & Extraction Monitor 5000

H<sub>2</sub>S - Gás Sulfídrico

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IPT – Instituto de Pesquisas Tecnológicas

ISWA - International Solid Waste Association

LABOSAN – Laboratório de Saneamento Ambiental

LR – Logística Reversa

MMA – Ministério do Meio Ambiente

MME – Ministério de Minas e Energia

NBR - Norma Brasileira

O<sub>2</sub> - Gás Oxigênio

PGRSS – Plano de Gerenciamento dos Resíduos de Serviços de Saúde

pH - Potencial Hidrogeniônico

PNRS - Política Nacional dos Resíduos Sólidos

PNSB – Pesquisa Nacional de Saneamento Básico

RDC- Resolução da Decisão Colegiada

RDO – Resíduos Domésticos

RS - Resíduos Sólidos

RSS – Resíduos do Serviço de Saúde

RSU – Resíduos Sólidos Urbanos

SEMACE – Superintendência Estadual do Meio Ambiente

SNSA – Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental

UFC – Universidade Federal do Ceará

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>15</b>
1.1 Objetivos.....	17
1.1.1 Objetivo Geral.....	17
1.1.2 Objetivos Específicos .....	17
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>18</b>
2.1 Caracterização e Classificação dos Resíduos sólidos.....	18
2.2 Geração e coleta dos resíduos sólidos no Brasil.....	19
2.3 Aterros sanitários e impactos ambientais .....	19
2.4 Geração, composição e aproveitamento do biogás de aterros sanitários.....	20
2.5 Lixiviados de aterros sanitários .....	27
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>29</b>
3.1 Área do ASMOC .....	29
3.3 Preenchimento dos Lisímetros .....	32
3.4 Dados pluviométricos .....	34
3.5 Monitoramento dos lisímetros .....	36
3.6 Monitoramento do lixiviado .....	36
3.7 Caracterização da massa de resíduos.....	38
3.8 Avaliação do recalque da massa de lixo.....	44
3.9 Composição do biogás.....	45
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>48</b>
4.1 Lixiviado.....	48
4.1.1 Cor .....	51
4.1.2 Turbidez .....	52
4.1.3 pH.....	54
4.1.4 Alcalinidade .....	56
4.1.5 Cloretos .....	57
4.1.6 DQO.....	59
4.1.7 Fósforo .....	61
4.1.8 Séries nitrogenadas (amônia, nitrito e nitrato).....	62

4.1.9	Frações de sólidos (totais, fixos e voláteis) .....	67
4.1.10	Coliformes totais e <i>E.coli</i> .....	71
4.2	Biogás .....	73
4.2.1	Lisímetro 01: preenchido 100% com os resíduos na forma que chegam ao aterro sanitário .....	74
4.2.2	Lisímetro 02: preenchido 50 % com os resíduos na forma que chegam ao aterro sanitário e 50% com material orgânico .....	78
4.2.3	Lisímetro 03: preenchido 100% com os resíduos de material orgânico .....	82
4.2.4	Leitura no topo dos lisímetros: avaliação direta da composição do biogás.....	86
4.3	Caracterização da massa de resíduos.....	87
4.3.1	Frações de sólidos .....	88
4.3.2	Compostos nitrogenados.....	89
4.3.3	Teor de umidade .....	91
4.4	Recalque da massa de resíduos.....	92
<b>5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....</b>		<b>94</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>		<b>97</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De acordo com os dados da Abrelp (2013), foi estimado que, para o ano de 2013, o país tenha coletado cerca de 189.219 toneladas de resíduos sólidos urbanos por dia, ou seja, algo em torno de 0,941 kg de resíduos produzidos para cada habitante.

Todavia, tais dados enfocam apenas parcelas estimativas dos resíduos produzidos no país, haja vista que, boa parte do todo ainda é precariamente coletada ou indevidamente disposta em locais inadequados, prejudicando, assim, o meio ambiente, por meio de uma ampla gama de impactos ambientais adversos.

Conforme De Matos (2008), a quantidade de resíduos sólidos produzidos em uma sociedade é proporcional a alguns fatores, como por exemplo, o crescimento demográfico e os níveis de consumo, por conta da forte globalização, necessitando de medidas adequadas e eficientes para o gerenciamento e controle.

Para Santos (2012), a geração de resíduos sólidos causa impactos ambientais negativos nas esferas sociais, econômicas e ambientais em todo o mundo, sendo o crescimento populacional e a forte pressão de consumo de produtos um grande desafio para o poder público e para a sociedade na adoção de medidas quanto a sua gestão integrada<sup>1</sup> e o gerenciamento ambientalmente corretos.

Segundo Fonseca (2001) e Silva (2013), o aterro sanitário torna-se uma das principais formas de disposição de resíduos sólidos. Para os mesmos, os resíduos, ao serem depositados nesses ambientes, entram em decomposição, gerando líquidos e gases que podem afetar diretamente o meio ambiente, se não forem devidamente tratados.

Conforme Levy e Cabeças (2006) e De Matos (2008), o aterro apresenta como vantagem ser um método comum e econômico de disposição dos resíduos sólidos, sendo uma medida de destino último, justamente pelo fato de outros mecanismos de tratamento gerarem sempre subprodutos para a disposição.

---

<sup>1</sup> Gestão integrada: conjunto de ações voltadas para a busca de soluções para os resíduos sólidos, de forma a considerar as dimensões política, econômica, ambiental, cultural e social, com controle social e sob a premissa do desenvolvimento sustentável (Artigo 3º, XI da Lei 12.305/2010).



Entretanto, existem também os malefícios inerentes ao uso de um aterro sanitário, principalmente quando da sua má gestão. Conforme alguns estudos (KJELDSEN e FISCHER, 1995; JOHANNESSEN, 1999; THEMELIS e ULLOA, 2007; SANTOS, 2012), as preocupações ambientais são relativas à poluição das águas, odores, riscos de explosão, danos à vegetação e emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE).

Dentre os principais gases gerados durante o processo de decomposição da matéria orgânica, tem-se o Metano ( $\text{CH}_4$ ) e o Dióxido de Carbono ( $\text{CO}_2$ ), sendo o primeiro aproximadamente 21 vezes mais eficiente no aprisionamento do calor na atmosfera (CONEJERO, 2006). Por outro lado, esses gases naturalmente produzidos nos aterros, também chamados de biogás, podem ser utilizados de forma benéfica para geração de energia, com a mitigação dos impactos adversos (JUCÁ, 2002).

Para melhor compreender as interações físico-químicas e biológicas que ocorrem em aterros de resíduos sólidos urbanos ao longo do tempo, faz-se necessário desenvolver métodos que facilitem o estudo dos fatores que interferem no processo de biodegradação. Um método eficiente é a construção de células experimentais em escala reduzida ou de lisímetros, que representam uma técnica bastante eficiente e de baixo custo.

O lisímetro é um biorreator representativo de lixo em escala reduzida, dotado de sistema de drenagem de líquidos e gases, tubos de coleta de amostras sólidas, temperatura, concentração e fluxo de gases, proporcionando a obtenção de parâmetros sob condições controladas (JUCÁ, 2003; SILVA, 2013). Sua finalidade é simular e acelerar a decomposição aeróbia e anaeróbia dos resíduos, proporcionando o maior conhecimento dos processos microbiológicos (BARLAZ, 1996; SILVA, 2013).

Desta forma, este trabalho teve como objetivo acompanhar os processos envolvidos na biodegradação da massa de resíduos sólidos presentes em lisímetros inseridos numa área pertencente ao Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia, de forma a tentar simular o comportamento dentro de células nos aterros sanitários. Para facilitar o entendimento, foram avaliados parâmetros como a composição do biogás, análises físico-químicas e bacteriológicas do lixiviado, bem como a caracterização da biomassa e a vazão de biogás para fins energéticos.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

Avaliar o comportamento da massa de resíduos sólidos e dos produtos derivados, utilizando três lisímetros experimentais preenchidos com diferentes composições de resíduos, em uma área teste no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC).

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Analisar o potencial de biodegradabilidade dos resíduos sólidos nos lisímetros, por meio de dados como: recalque, geração de biogás, caracterização dos resíduos e produção de efluente;
- Acompanhar o processo de biodegradação dos resíduos nos lisímetros, determinando as características físico-químicas e bacteriológicas dos efluentes gerados;
- Avaliar a composição do biogás, verificando a sua relação com o processo da biodegradação da massa de resíduos sólidos no interior dos lisímetros, para diferentes composições de enchimento.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Caracterização e Classificação dos Resíduos sólidos

Conforme preconiza a lei nº 12.305/2010, que instituiu a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), em seu art. 3º, inciso XVI, os resíduos sólidos (RS) são caracterizados como qualquer material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólidos ou semi-sólidos, bem como, gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviável em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Haja vista o grande uso de insumos pela população humana, juntamente com a elevada densidade populacional nos grandes centros urbanos e o intenso processo de globalização, a geração de grandes quantidades de RS torna-se bastante evidenciada.

No caso particular dos resíduos sólidos urbanos, a maior parte dos materiais coletados e destinados ao aterro sanitário deve-se a compostos orgânicos na fração de 51,4%, conforme o indicado na Tabela 01, ou seja, aproximadamente 29 milhões de toneladas/ano.

Tabela 01: Composição gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil em 2012.

Material	Participação (%)	Quantidade (t/ano)
Metais	2,9	1.640.294
Papel, Papelão e TetraPak	13,1	7.409.603
Plástico	13,5	7.635.851
Vidro	2,4	1.357.484
Matéria Orgânica	51,4	29.072.794
Outros	16,7	9.445.830
<b>TOTAL</b>	<b>100,0</b>	<b>56.561.856</b>

Fonte: ABRELP (2012).

## **2.2 Geração e coleta dos resíduos sólidos no Brasil**

De acordo os dados da Abrelp (2013), cerca de 58% de resíduos sólidos urbanos (RSU) são destinados de forma adequada no Brasil. Vale ressaltar que esses 42% inadequados representam uma soma de, aproximadamente, 79 mil toneladas diárias, ou seja, uma elevada soma que segue o destino para aterros controlados ou lixões. Uma das medidas a serem adotadas para o gerenciamento desse enorme contingente seria a correta implantação dos programas de coleta seletiva.

Conforme Cempre (2013), apenas 14% dos 5.471 municípios estão operando corretamente com o sistema de coleta seletiva, ou seja, algo em torno de 766 experiências implantadas e em funcionamento. O valor percentual apresentado acima se refere a aproximadamente 27 milhões de habitantes brasileiros contemplados com tal iniciativa.

Conforme MMA (2012), do ponto de vista da coleta regular dos RS, este tem sido o principal foco da gestão brasileira nos últimos anos. A taxa de cobertura vem crescendo continuamente, já alcançando, em 2009, quase 90% do total de domicílios. Na área urbana, a coleta supera o índice de 98%, todavia, a coleta em domicílios localizados em áreas rurais ainda não atinge 33%, aproximadamente.

Outras formas de encaminhamento dos RSU são a compostagem e a triagem. Conforme IPEA (2012), os valores diários destinados a esses sistemas são de 1.519,5 toneladas, representando 0,8% do total.

No Brasil, a maior parte dos resíduos sólidos de origem domiciliar é de natureza orgânica, composta predominantemente por sobras de alimentos. Para MMA (2012), do total estimado de resíduos orgânicos que são coletados, ou seja, 94.335,1 t/dia, somente 1,6% (1.519 t/dia), é encaminhado para tratamento via compostagem (PPIAF, 2011).

## **2.3 Aterros sanitários e impactos ambientais**

Para Figueiredo (1995), mesmo que os aterros sanitários constituam forma adequada para disposição dos resíduos, podem provocar sérios impactos ambientais, devido à necessidade constante de controle e manutenção, o que nem sempre acontece, até porque são raros os que operam convenientemente bem sobre o ponto de vista ambiental.

Deve-se também levar em consideração, conforme CEMPRE (1995), que, ao contrário dos aterros sanitários, os aterros controlados não possuem impermeabilização dos solos nem sistema de dispersão de chorume e gases, sendo comum nesses locais a contaminação de águas subterrâneas, o que vem a ser um sério dano ambiental e de difícil mitigação.

Schneider *et al.* (2000) advertem que os mananciais de água passíveis de recebimento de lixiviados apresentam modificação de coloração, depressão de oxigênio dissolvido e presença de patogênicos, causando impactos no meio aquático, com quebra do ciclo de vida das espécies.

Para ANVISA (2004), os RS podem apresentar também uma série de agentes com potencialidade de oferecer riscos biológicos, quando do contato com os seres humanos, citando-se as bactérias como: *Escherichia coli*, *Klebsiella sp.*, *Enterobacter sp.*, *Proteus sp.*, *Staphylococcus sp.*, *Enterococcus*, *Pseudomonas sp.*, *Bacillus sp.* e *Cândida sp.*

#### **2.4 Geração, composição e aproveitamento do biogás de aterros sanitários**

Segundo IPEA (2012), o biogás para aproveitamento energético pode ser proveniente não apenas de captura em aterros sanitários, mas também, de vários tipos de rejeitos, como efluentes urbanos (esgoto), dejetos de animais e/ou vegetais em biodigestores, vinhoto ou, ainda, da indústria de celulose. Esse biogás pode ser utilizado na sua forma bruta, gerando energia por “queimadores” (*flairs*), em substituição ao gás de cozinha, ou pode ainda ser melhorado mediante tecnologia específica (enriquecendo o gás resultante de cerca de 55% CH<sub>4</sub>, para 92% CH<sub>4</sub>) para substituir o gás natural em veículos ou na indústria.

Conforme observado na Tabela 02, a composição do biogás apresenta, em sua maioria, o metano, dióxido de enxofre, nitrogênio e oxigênio, sendo os demais reportados como gases traço.

Tabela 02: Composição do biogás de aterro sanitário.

<b>Composição</b>	<b>Porcentagem (base seca)</b>
Metano	45 - 60
Dióxido de Carbono	40 - 60
Nitrogênio	2 - 5
Oxigênio	0,1 - 1,0
Enxofre, Mercaptanas	0 - 1,0
Amônia	0,1 - 1,0
Hidrogênio	0 - 0,2
Monóxido de Carbono	0 - 0,2
Gases em menor concentração	0,01 - 0,6

Fonte: Silva (2013).

O metano é produzido na biodegradação da matéria orgânica e apresenta potencial de aquecimento global de cerca de 21 a 27 vezes maior que o CO<sub>2</sub>. Caso esse gás esteja presente em elevadas concentrações nos aterros sanitários, o risco é iminente para incêndios e explosões, principalmente em instalações próximas aos aterros (FISCHER *et al.*, 1999; BARH *et al.*, 2006).

A alta característica de inflamabilidade do metano deve-se por que o mesmo necessita estar presente, apenas, em condições de pressão atmosférica e temperatura ambiente nas concentrações de 5 a 15%. O limite de concentração seguro para a não ocorrência de explosões em ambientes fechados é de 1% de metano (FISCHER *et al.*, 1999).

Quanto à geração do biogás, Fernandes (2009) afirma que uma tonelada de RSU depositada em aterros resulta em aproximadamente 160 a 250 m<sup>3</sup> de biogás. Entretanto, para EEA (2004), a composição e produção do biogás pode variar de um local para outro ou mesmo de uma célula para outra no próprio aterro sanitário.

No caso do teor de metano existente em aterros sanitários, Humer e Lechner (1999) informam que uma tonelada de RSU produz aproximadamente de 88 a 138 m<sup>3</sup> de metano, potencial este que pode ser devidamente utilizado para fins energéticos.

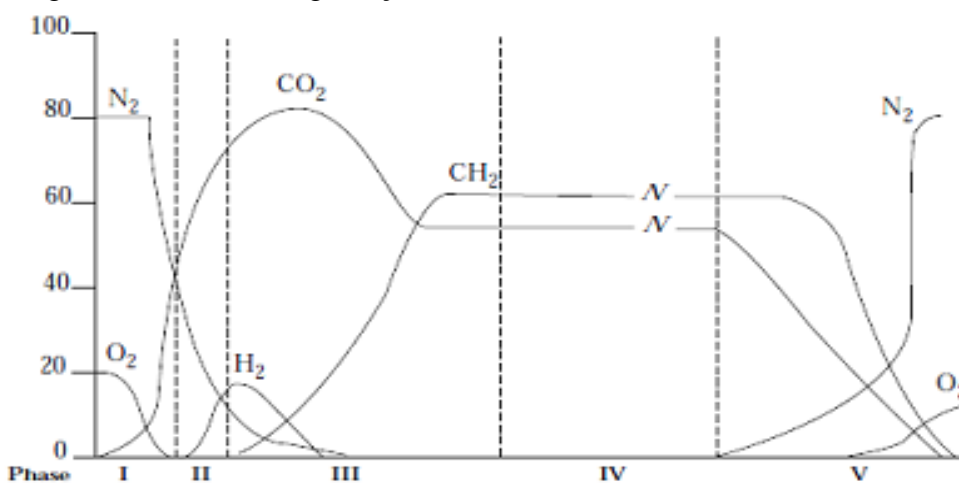
Para Silva (2013), a quantidade total de gases acaba sendo produzida diferenciadamente ao longo do tempo, de acordo com as fases de decomposição dos resíduos e os inúmeros fatores intervenientes no processo de degradação.

Segundo Silva (2013), quando da degradação da matéria orgânica para a produção de biogás, os principais decompositores presentes na massa de resíduo são as bactérias, e, em menor escala, fungos e protozoários. Os grupos de bactérias presentes na decomposição anaeróbia da matéria orgânica são as bactérias fermentativas, acetogênicas produtoras de  $H_2$ , acetogênicas consumidoras de  $H_2$  e as metanogênicas.

Segundo a USEPA (1991), a produção do biogás pode ser realizada a partir da vaporização, decomposição biológica e reações químicas. A vaporização é a mudança de estado líquido para gasoso que ocorre até que sejam atingidas concentrações de equilíbrio nos gases do aterro. A decomposição biológica ocorre quando compostos orgânicos de grande massa molecular são decompostos por bactérias, gerando compostos voláteis. A reação química ocorre como resultado do contato entre o resíduo e os gases reativos gerados no aterro

A geração de gases em aterros sanitários pode ser vista por meio de um diagrama de fases, como mostrado na Figura 01. As etapas que ocorrem durante a degradação dos resíduos sólidos são: de ajuste inicial (I), transição (II), ácida (III), metanogênica (IV) e maturação (V) (TCHOBANOGLIOUS, *et al* 1994; USACE, 2008). Já na Tabela 03 é possível compreender as características específicas em cada fase de degradação dos resíduos sólidos.

Figura 01: Fases de degradação dos resíduos sólidos.



Fonte: Johannessen (1999).

Tabela 03: Fases de degradação dos resíduos sólidos em um aterro sanitário.

<b>1ª FASE (FASE INICIAL)</b>	<b>2ª FASE (FASE DE TRANSIÇÃO)</b>	<b>3ª FASE (FORMAÇÃO ÁCIDA)</b>	<b>4ª FASE (FERMENTAÇÃO METANOGÊNICA)</b>	<b>5ª FASE (MATURAÇÃO FINAL)</b>
<p>Aterramento dos resíduos nas células e início do acúmulo de umidade;</p> <p>Compactação inicial dos resíduos e fechamento das células do aterro;</p> <p>Deteção das primeiras mudanças dos diferentes parâmetros de degradação dos resíduos.</p>	<p>Capacidade de retenção em água dos resíduos é ultrapassada e inicia-se a formação lixiviados;</p> <p>Passagem de condições aeróbias para anaeróbias. O aceptor de elétron passa do O<sub>2</sub> para os nitratos e sulfatos;</p> <p>Concentrações de metabólitos intermediários (AGVs) surgem nos lixiviados;</p> <p>Tendências perceptíveis de instalação de condições redutoras no meio.</p>	<p>Os ácidos graxos voláteis (AVGs) se tornam preponderantes nos lixiviados;</p> <p>Diminuição do pH se produz com mobilização e possível complexação de espécies metálicas;</p> <p>Consumo de N<sub>2</sub> e fósforo (P) para o crescimento dos microrganismos;</p> <p>Deteção do H<sub>2</sub> e influência na natureza dos produtos intermediários formados.</p>	<p>Produtos intermediários que apareceram na fase ácida são transformados em metano e dióxido de carbono em excesso;</p> <p>Crescimento do pH a valores mais elevado, controlado pela capacidade tampão do sistema;</p> <p>-Potencial de óxido – redução se encontra em valores baixos e consumo importante de nutrientes;</p> <p>Fenômenos de complexação e precipitação de metais continuam a ocorrer;</p> <p>Carga orgânica dos lixiviados decresce e a produção de gases aumenta proporcionalmente.</p>	<p>Estabilização dos componentes orgânicos disponíveis os resíduos e solubilizados nos lixiviados;</p> <p>Concentrações em nutrientes inicialmente elevadas se tornam limitantes;</p> <p>Produção de gases entra em queda acentuada e, em seguida, cessa;</p> <p>O<sub>2</sub> e espécies oxidadas reaparecem lentamente e um aumento do potencial redox é observado;</p> <p>Matérias orgânicas resistentes a biodegradação são convertidas em moléculas como ácidos húmicos.</p>

Fonte: Filho (2005).

Conforme Santos (2012), em função dessas fases, a velocidade e o volume da produção de gases, bem como sua composição, são específicos de cada aterro e ao mesmo tempo diferentes em cada ponto do aterro.

Autores como Castilhos Júnior, Gomes e Pessin (2003), reportam que:

Embora essa divisão do processo de digestão anaeróbia em fases facilite bastante o entendimento dos fenômenos de estabilização biológica dos RSU e seus impactos sobre a composição dos lixiviados e emissões gasosas, na prática, durante a vida de um aterro, essas fases não são tão bem definidas (CASTILHOS JÚNIOR, GOMES e PESSIN, 2003, p.33).



De acordo com Tchobanoglous, Thessen e Vigil (1994); Johannessen (1999); Santos (2012), os principais fatores que afetam a geração de gases nos aterros sanitários são a composição dos resíduos (I), o tamanho das partículas (II), temperatura (III), umidade (IV), pH (V), a geometria, operação e cobertura do aterro (VI) e idade dos RSU (VII).

Desta forma, ante aos fatores que afetam diretamente os gases nos aterros sanitários foi relatado por Santos (2012) que:

- (I) Quanto maior for o percentual de materiais biodegradáveis, maior será a taxa de geração de gases. Entretanto, o início e a duração desta dependem da natureza dos materiais inseridos no aterro, se altamente degradáveis ou um pouco mais recalcitrantes;
- (II) A influência do tamanho das partículas está diretamente ligada à velocidade de degradação, que é maior em resíduos menores, tanto nos processos aeróbios quanto nos anaeróbios;
- (III) As temperaturas internas e externas dos aterros sanitários têm um importante significado no processo de decomposição dos RSU, pois a temperatura atua na cinética das reações químicas e na atividade dos microrganismos. Geralmente, quanto mais elevada for a temperatura, maior será a atividade bacteriana, ressaltando porém os respectivos limites de tolerância;
- (IV) A caracterização da umidade vai depender de vários fatores como composição e condições iniciais dos RSU, clima, procedimento de operação do aterro, existência ou não de recirculação de líquidos (geralmente, o seu aumento favorecerá a geração de gases). Se a umidade for muito baixa, há grande atraso na decomposição dos RSU, pois através dela é realizado o transporte difuso de bactérias e nutrientes;
- (V) A importância do pH está relacionada ao acompanhamento do processo de decomposição. Inicialmente, o aterro tem um pH ácido, que tende à neutralidade quando a fase metanogênica vai predominando, sendo que, em pH neutro tem-se a condição ideal de produção de biogás;
- (VI) A geometria, operação e cobertura do aterro influenciam na produção de gases, sob vários aspectos, como por exemplo, aterros com altura elevada e com um sistema eficiente de impermeabilização da camada de cobertura fomentam o predomínio de atividade anaeróbia.

A correta compactação realizada durante a operação do aterro aumenta a densidade dos resíduos, o que propicia o encurtamento da fase aeróbia.

- (VII) A idade dos RSU irá influenciar na qualidade e volume dos gases. Geralmente, resíduos novos produzem mais gases e com maior teor de metano, enquanto que os resíduos mais antigos podem ter sua capacidade potencializada através da recirculação dos líquidos percolados no aterro.

Para os resíduos mais antigos, a recirculação do percolado apresenta-se como um efeito positivo na formação do metano, justamente por aumentar o teor de água e fornecer e distribuir nutrientes e biomassa (ZHANG, HE e SHAO, 2008; ABUSHAMMALA *et al.*, 2010).

Além disso, conforme Santos (2012), trata-se de uma opção complementar de tratamento do lixiviado, uma vez que propicia a atenuação de constituintes pela atividade biológica e por reações físico-químicas que ocorrem no interior do aterro. A recirculação diminui também o volume do lixiviado em função da evaporação.

De acordo com a Tabela 04, proposta por Santos (2012), enquadram-se como baixo potencial de favorecimento ao processo de geração do biogás a densidade, tamanho das partículas, nutrientes, bactérias e hidrogênio; como médio potencial de favorecimento, a composição do lixo, temperatura e pH, e como alto potencial de favorecimento a umidade. Quanto à inibição da geração de gases, o autor refere-se a sulfatos e metais (baixa inibição), tóxicos (média) e oxigênio (alta).

Tabela 04: Fatores que contribuem para a geração de biogás em aterros sanitários.

Parâmetros	Potencial de Favorecimento ou Inibição		
	baixo	médio	alto
composição do lixo			
densidade			
tamanho das partículas			
temperatura			
pH			
nutrientes			
bactérias			
umidade			
oxigênio			
hidrogênio			
sulfato			
tóxicos			
metais			

Fonte: Santos (2012).

Conforme disposto na Tabela 04, percebe-se, de forma mais clara, o potencial de cada fator aos processos de degradação dos resíduos sólidos e a influência de cada etapa na geração do biogás, bem como a relação com os parâmetros físico-químicos e bacteriológicos e os produtos gerados do processo degradativo.

De acordo com Silva (2013), a biodegradação que ocorre nos aterros sanitários é predominantemente anaeróbia, porém ocorre também a degradação aeróbia, com presença de oxigênio, em um pequeno espaço de tempo, logo após o aterramento.

Para o IPT (2000), o processo da digestão aeróbia é breve, durando de alguns dias a aproximadamente um mês em aterros rasos com profundidade de até 3,0m. Já para a ISWA (2010), a decomposição aeróbia pode durar seis ou mais meses, dependendo do contato dos resíduos com o ar da superfície do aterro.

Segundo Lo (1996), em regiões de clima mais quente e úmido, a decomposição da matéria orgânica dos RSU nos aterros sanitários será acelerada e a fase metanogênica será alcançada mais rapidamente, muitas vezes dentro do primeiro ano de funcionamento do aterro.

Segundo Castilhos *et al.* (2003), o processo de degradação dos resíduos sólidos é um fenômeno constituído essencialmente pela superposição de mecanismos biológicos e físico-químicos, catalisados pelo fator água, presente nos resíduos pela umidade inicial e pelas águas das precipitações.

Para Silva (2013), a estimativa da produção total de gases baseia-se na determinação das diversas frações que compõem o lixo. As frações mais facilmente decompostas, como as orgânicas, são as que definem a quantidade de biogás que pode ser produzida por unidade de volume de resíduo.

De acordo com Barlaz (1996), os constituintes inorgânicos podem afetar diretamente a degradação, pois, em alguns casos, estão dispostos “encapsulando” ou isolando os resíduos orgânicos e dificultando a ação das bactérias.

## 2.5 Lixiviados de aterros sanitários

No caso de aterros de resíduos sólidos, os líquidos percolados sobre uma massa de lixo disposta na natureza e que fluem através de um meio poroso, filtrando e extraindo substâncias deste meio, para a definição da NBR 10.703/89, compreende, geralmente, ao chorume, a água de infiltração e o material lixiviado.

Quando a água realiza a percolação entre a massa de resíduo em decomposição, materiais biológicos e componentes químicos tem-se um processo de mistura dando origem a um efluente devidamente caracterizado como lixiviado. (JOHANSEN; CARLSON 1976, ROBINSON; MARIS 1979, FULLER *et al.*, 1979; LEMA *et al.* 1987 e CLEMENT, 1995).

Para Alcantara (2007), o lixiviado pode ser descrito como o líquido que se infiltra através dos resíduos sólidos em decomposição e extrai materiais, sejam dissolvidos ou em suspensão, e que contém produtos biológicos e constituintes químicos, resultando portanto, da hidrólise de compostos orgânicos e da umidade do sistema.

Assim como é considerável o impacto dos efluentes em aterros sanitários, o lixiviado torna-se um grande fator de risco para o meio ambiente e para a população, uma vez que apresenta altas concentrações de material orgânico, bem como quantidades consideráveis de metais pesados em sua composição, carecendo portanto de cuidados para o tratamento, lançamento e monitoramento por parte dos gestores de aterros sanitários.

Conforme definição da NBR 10.703/89, é sabido a relação direta entre os líquidos percolados e a produção de lixiviado, sendo o fator chuva um influente catalizador deste processo. Entretanto, qualquer tentativa de se relacionar tais fatores pode, no mínimo, ser arriscada, se não se levar em conta o grau de estabilização e a capacidade de retenção de água dos resíduos sólidos (TATSI; ZOUBOULIS, 2002).

A presença de precipitações na área do aterro sanitário torna-se importante para a produção de líquidos, entretanto, algumas características climáticas do local podem também ter correspondência, tais como: a temperatura, umidade e taxa de evaporação.

Para tais exemplos, foi reportado por LO (1996) que, a concentração do lixiviado em Hong Kong não variou sazonalmente, isto é, entre as épocas de chuva e seca. Já para Tatsi; Zouboulis (2002) foi encontrado que os lixiviados produzidos em aterros localizados na Grécia, na época de seca, foram mais concentrados do que os produzidos na época de chuva.

Para Segato (2000), a depender da idade dos resíduos sólidos presentes nos lisímetros, a composição química do lixiviado pode apresentar alguma variação, como por exemplo: se o lixiviado é coletado durante a fase ácida, o pH será baixo, porém parâmetros como DBO<sub>5</sub>, DQO, nutrientes e metais pesados deverão ser elevados. Contudo, durante a fase metanogênica o pH varia entre 6,5 e 7,5 e os valores de DBO<sub>5</sub>, DQO e nutrientes são significativamente menores.

Segundo Hamada (1997), a biodegradabilidade do lixiviado varia com o tempo e pode ser determinada pela variação da relação DBO<sub>5</sub>/DQO. Em aterros novos, a relação DBO<sub>5</sub>/DQO fica em torno de 0,5. Índices entre 0,4 e 0,6 são indicadores de melhor biodegradabilidade. Já em aterros mais velhos, esta relação varia, geralmente, entre 0,05 e 0,2. Quanto maior a razão entre a DBO<sub>5</sub> e a DQO, mais facilmente o lixiviado será tratado biologicamente.

Quanto à importância no controle do lixiviado por conta do impacto ambiental por ele causado, Andrade (2001) reporta que, a utilização do processo de recirculação pode ser considerada como a forma de tratamento, já que, além de reduzir o volume por evaporação, aumenta a degradação anaeróbia no interior do aterro com a conversão de ácidos orgânicos em CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, promovendo uma melhor distribuição de nutrientes e umidade.

Além da influência da recirculação sobre o processo de degradação da massa de resíduos sólidos urbanos, estudos realizados por Reinhart *et Al-Yousfi* (1996) demonstraram que a utilização desta técnica aumentou a eficiência de compactação do aterro, facilitando o posterior reaproveitamento do terreno e diminuindo o tempo necessário para a estabilização do aterro.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área de estudo

A pesquisa foi realizada no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), localizado no Município de Caucaia-Ceará, que se encontra limitado pelos paralelos 3° 45' e 3° 47' de longitude Sul e pelos meridianos 38° 43' e 38° 45' de longitude Oeste, estando localizado na margem esquerda do 1,6 km da BR-020, em Caucaia-CE.

O ASMOC ocupa uma área equivalente a 123,20 ha, dos quais 78,47 ha são destinados ao recebimento e confinamento dos resíduos sólidos, dentre outros setores, e recebe resíduos sólidos domiciliares gerados nos municípios de Fortaleza/CE e Caucaia/CE.

O aterro sanitário foi implantado em 1991, recebendo somente os resíduos sólidos gerados no município de Caucaia/CE. Com a extinção do antigo lixão do Jangurussú, em Fortaleza/CE, em 1997, o aterro passou também, a receber resíduos provenientes de tal município.

Nas Figuras 02 e 03 têm-se a imagem de satélite e da entrada da área do aterro sanitário, respectivamente. Na Tabela 5 é apresentada a distribuição dos setores no aterro.

Figura 02: Imagem de satélite da área do ASMOC.



Fonte: Silva (2013).

Figura 03: Vista da área de acesso ao ASMOC.



Fonte: Silva (2013).

Tabela 05: Distribuição, por setores, da área pertencente ao ASMOC.

Tipo de Ocupação	Área (ha)	%
Administração/Urbanização/Estacionamento	2,35	1,9
Sistema Viário (Acesso Interno)	3,19	2,6
Área para compactação dos Resíduos	78,47	63,71
Faixa de Preservação do Contorno	7,04	5,7
Área de Preservação Ambiental	32,15	26,1
<b>Total</b>	<b>123,20</b>	<b>100,00</b>

Fonte: Santos (2009); Silva (2013).

Vale salientar que, além dos resíduos classificados como domiciliares, o aterro sanitário recebe ainda os resíduos públicos caracterizados como especiais, tais como entulhos (resíduos de construção civil) e de poda.

Na Tabela 06 percebe-se a grande quantidade de resíduos sólidos que são encaminhados ao aterro sanitário, sendo a média encontrada, para o ano de 2013, de 176.548,91 toneladas/mês.

Tabela 06: Quantidades de resíduos, em toneladas, destinadas ao ASMOC em 2013.

QUANTIDADE DE TONELADAS 2013 - ASMOC												
JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ	MÉDIA ANUAL
176649,81	167869	174368,1	181290,9	196765,6	181389,2	189017,1	180140	169626,1	190166,2	157238,2	154066,6	176548,9

Fonte: Adaptada pelo autor, a partir de dados do ASMOC (2014).

### 3.2 Os lisímetros

A pesquisa foi desenvolvida utilizando-se três lisímetros, como se pode observar na Figura 04, numa área adjacente ao aterro sanitário, com aproximadamente 16 m<sup>2</sup>, tendo os locais onde os mesmos foram implantados as seguintes coordenadas:

- Lisímetro L1: 3° 47' 58.6 de longitude Sul e 38° 40' 21.4 de longitude Oeste;
- Lisímetro L2: 3° 47' 58.5 de longitude Sul e 38° 40' 21.3 de longitude Oeste;
- Lisímetro L3: 3° 47' 58.4 de longitude Sul e 38° 40' 21.2 de longitude Oeste.

Conforme construção realizada por Silva (2013), cada lisímetro foi implantado com três manilhas de concreto armado de 1m de diâmetro interno e 1m de altura, sobrepostas e seladas na junção com uma pasta de cimento, formando um cilindro rígido de três metros de altura, compreendendo um volume de 2,4 m<sup>3</sup>, cada (Figura 04).

Figura 04 - Vista geral dos lisímetros utilizados na pesquisa.



Fonte: Silva (2013).



Os três lisímetros foram preenchidos com resíduos de diferentes características:

- L1 – preenchido 100 % com os resíduos sólidos na forma como chegam ao aterro sanitário;
- L2 – preenchido com 50% de resíduos sólidos na forma que chegam ao aterro e 50% somente com matéria orgânica;
- L3 – preenchido 100% somente com matéria orgânica presente nos resíduos.

Esta pesquisa deu continuidade ao trabalho de Silva (2013) para monitorar a presença dos gases gerados pela massa interna de resíduos, a presente pesquisa teve como foco avaliar continuamente a atual situação dos mesmos, bem como a capacidade de suporte e geração de biogás num maior intervalo de tempo, haja vista a construção dos lisímetros ter ocorrido em abril de 2012. Para esta pesquisa, os dados coletados se reportam ao período de novembro de 2013 a julho de 2014.

### 3.3 Preenchimento dos Lisímetros

Para o estudo da degradação dos resíduos sólidos e a avaliação dos subprodutos gerados pela atividade metabólica, realizou-se a simulação de uma coluna de massa em um aterro sanitário utilizando-se lisímetros, os quais foram devidamente preenchidos por Silva (2013) com os materiais encontrados no aterro sanitário, de acordo com o demonstrado na Figura 05.

Figura 05 - Concentrações de materiais em cada lisímetro.



Fonte: Silva (2013).

A disposição dos resíduos segundo a metodologia dos lisímetros tem como foco a avaliação da influência das diferentes características de composição para a produção de gás, capacidade biodegradante da massa de lixo e produção de lixiviado.

A composição gravimétrica dos resíduos foi determinada pelo método do quarteamento, e os resultados constam da Tabela 07.

Tabela 07 - Composição Gravimétrica dos Resíduos Sólidos Urbanos destinados ao Aterro Sanitário de Caucaia, Ceará, maio/2012.

Tipo de Material	% (em peso)
Papel / Papelão	9,16
Plástico	12,92
Metal	2,13
Vidro	2,31
Outros	24,72
Matéria Orgânica	41,40
Total	100,00

Fonte: Silva (2013).

Quando da montagem dos lisímetros por Silva (2013) foram necessários três caminhões para o enchimento dos mesmos, sendo o primeiro caminhão escolhido, direcionado para o enchimento do Lisímetro 01 (100% do material na forma como chega ao aterro) e metade do Lisímetro 02 (50% na forma como chega ao aterro sanitário). Os outros caminhões restantes continham apenas material orgânico, sendo, portanto, direcionados para o enchimento da parte superior do Lisímetro 02 (50% matéria orgânica) e de todo o Lisímetro 03 (100% de matéria orgânica).

Em termos de massa, foram inseridas no Lisímetro 01 cerca de 02 toneladas; no Lisímetro 02, a estimativa foi de 2,5 toneladas; e no Lisímetro 03, aproximadamente 2,6 toneladas, haja vista se ter um maior peso específico para o material orgânico quando comparado à fração da forma como chegam os resíduos no aterro sanitário.

Após o preenchimento de cada lisímetro com os seus respectivos materiais, os mesmos foram devidamente compactados com a ajuda de soquetes manuais. Posteriormente à compactação, cada lisímetro foi selado com uma camada de solo argiloso.

Na Figura 06, mostram-se detalhes dos preenchimentos dos lisímetros.

Figura 06 - Preenchimento dos lisímetros.



Fonte: Adaptado de Silva (2013).

O solo utilizado na cobertura dos resíduos nos lisímetros foi o mesmo usado nas células do aterro sanitário, sendo a espessura da camada utilizada com cerca de 15 centímetros de espessura. O mesmo compactador utilizado para a massa de resíduos foi empregado para a compactação do solo.

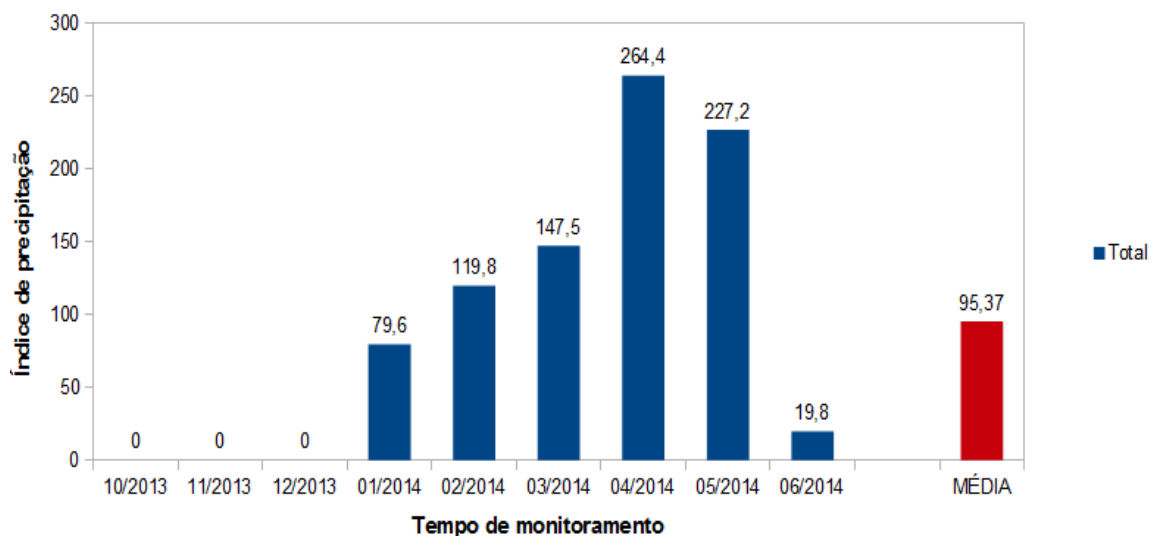
### 3.4 Dados pluviométricos

Considerando que as precipitações pluviométricas na região dos lisímetros poderiam apresentar alguma influência na geração de gases e na produção de lixiviado, foi efetuado levantamento dos dados em posto pluviométrico próximo ao local do aterro, de forma a se ter uma noção da pluviometria no local do experimento.

Os dados obtidos para a análise foram coletados na página eletrônica da Funceme. O posto analisado se refere ao município de Caucaia, onde fica a área em que a pesquisa foi realizada. Os dados analisados se referem ao intervalo temporal de outubro de 2013 a junho de 2014, período no qual foi realizado o trabalho de campo.

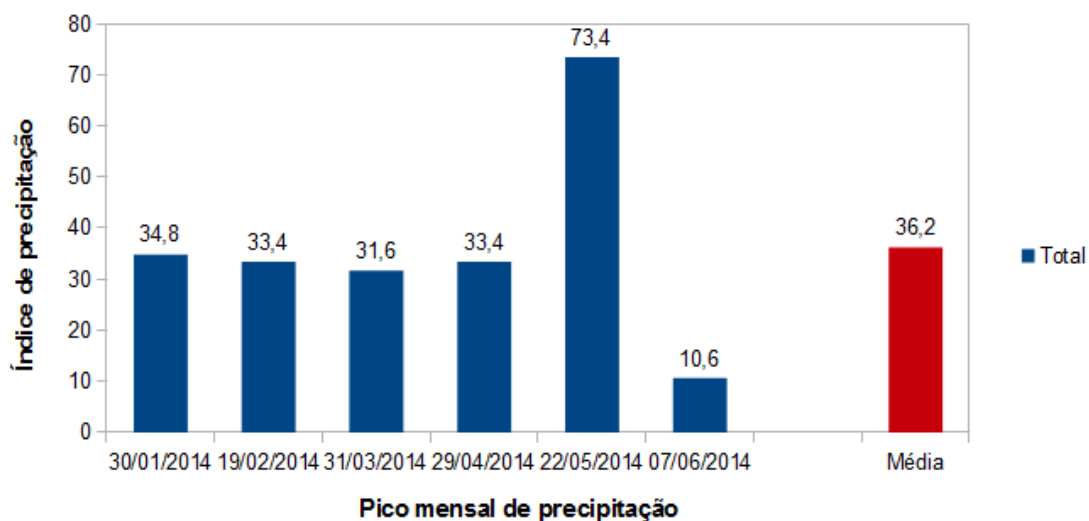
Na Figura 07 são apresentados os totais de precipitações por mês durante o período da pesquisa, enquanto que na Figura 08 são indicados os valores dos dias de maior precipitação em cada mês.

Figura 07 – Precipitações mensais no período da pesquisa. Caucaia, Ceará, 2014.



Fonte: Adaptado da Funceme (www.funceme.br, acesso em 30 jun. 2014).

Figura 08 – Maiores precipitações diárias por mês, na área da pesquisa. Caucaia, Ceará, 2014.



Fonte: Adaptado da Funceme (www.funceme.br, acesso em 30 jun. 2014).

Durante o tempo de monitoramento dos lisímetros notou-se aumento de precipitações a partir de janeiro e uma significativa redução a partir de junho significando uma tendência de estiagem durante o resto do ano.

Com os dados obtidos, esperava-se encontrar alguma influência direta na formação do lixiviado, assim como, em determinados momentos, para possíveis interferências nas concentrações dos gases gerados nos lisímetros.

### 3.5 Monitoramento dos lisímetros

O monitoramento dos lisímetros constou do acompanhamento dos seguintes dados: medição do biogás gerado (concentração, composição e vazão); análise do lixiviado, por meio de aspectos físico-químicos e bacteriológicos; caracterização da biomassa.

Em termos de monitoramento, a pesquisa teve como intuito avaliar a capacidade produtiva (em termos de biogás e lixiviado) dos lisímetros durante uma sequência cronológica e verificar os estágios evolutivos da degradação da biomassa.

#### 3.5.1 Monitoramento do lixiviado

Foi realizado, nesta pesquisa, um acompanhamento sistemático dos lixiviados gerados em cada lisímetro, de forma a verificar a possível correlação entre a capacidade degradativa e a produção de efluentes.

As amostras de lixiviados foram recolhidas diretamente em torneiras presentes nas bases de cada um dos lisímetros, em frascos de vidros com capacidade volumétrica de 01 litro. Na Figura 09, podem-se observar as torneiras de coleta do lixiviado na base de cada um dos lisímetros.

Figura 09 - Coleta de lixiviado na base dos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

Após a coleta, os frascos foram tamponados e devidamente acondicionados em caixas de isopor, para serem encaminhados ao Laboratório de Saneamento Ambiental – LABOSAN do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental - DEHA da Universidade Federal do Ceará – UFC, conforme indicado nas Figuras 10 e 11.

As coletas e análises foram realizadas, inicialmente, nos meses de janeiro e fevereiro de 2014, compreendendo um período de estiagem de chuvas, e, no segundo momento, no período de abril a junho de 2014, com maior incidência de chuvas na área do experimento.

Figura 10 - Amostra de lixiviados coletados nas bases dos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

Figura 11 - Amostras de lixiviados coletados nos Lisímetros 03 e 02.



Fonte: Autor (2015).

As análises dos lixiviados compreenderam: Cor Aparente, Turbidez, pH, Alcalinidade, Série Nitrogenada (Amônia, Nitrito, Nitrato), DQO, Sólidos, Condutividade, Cloretos, Fósforo, Metais e Coliformes Totais e Termotolerantes (*E. Coli*), conforme disposto na Tabela 08.

Os procedimentos de coleta e análises basearam-se nos protocolos estabelecidos pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).

Tabela 08 - Parâmetros físico-químicos e bacteriológicos e respectivas metodologias de análise.

Parâmetros	Metodologia de análise
Cor Aparente (uH)	Método Fotocolorimétrico
Turbidez (NTU)	Método Nefelométrico
Ph	Método potenciômetro
Alcalinidade (mg/L)	Método da Titulação potenciométrica
Amônia (mg/L)	Método de digestão Kjeldahl
Nitrito (mg/L)	Método do Colorimétrico
Nitrato(mg/L)	Método do Salicilato de sódio
DQO (mg/L)	Método de Refluxação fechada
Sólidos Totais (mg/L)	Método secagem a 103-105°C
Sólidos Fixos(mg/L)	Método secagem a 103-105°C, com calcinação
Sólidos Voláteis(mg/L)	Método secagem a 103-105°C, com calcinação
Cloretos (mg/L)	Método Argentométrico
Fósforo (mg/L)	Método do ácido ascórbico com digestão com persulfato de potássio
Coliformes Totais (mg/L)	Método dos tubos múltiplos (NMP)
Coliformes Termotolerantes (mg/L)	Método dos tubos múltiplos (NMP)

Fonte: Autor (2015).

### 3.5.2 Caracterização da massa de resíduos

Na caracterização da massa de resíduos foram realizadas análises físico-químicas, conforme a Tabela 09, de forma a subsidiar uma melhor compreensão do comportamento dessa massa e a relação direta com a produção de gases.

As coletas foram programadas para serem efetuadas até 10 de março de 2014, quando não foi observada uma maior incidência de chuvas na região, e no dia 20 de junho de 2014, data da coleta final de dados, após o período de chuvas.



Tabela 09 - Parâmetros físico-químicos e metodologias de análise da massa de resíduos.

Parâmetros	Metodologia de análise
Amônia (mg/L)	Método de digestão Kjeldahl
Nitrito (mg/L)	Método do Colorimétrico
Nitrato(mg/L)	Método do Salicilato de sódio
Sólidos Totais (mg/L)	Método secagem a 103-105°C
Sólidos Fixos(mg/L)	Método secagem a 103-105°C, com calcinação
Sólidos Voláteis(mg/L)	Método secagem a 103-105°C, com calcinação
Umidade	Método secagem a 60°-65°C

Fonte: Autor (2015).

No primeiro momento de coleta, as amostras foram recolhidas nas bases dos lisímetros, conforme indicado na Figura 12. Para que fosse possível o recolhimento de amostras da massa de resíduos, foram utilizadas tubulações adaptadas, conforme ilustra a Figura 13. As tubulações utilizadas consistem em um cano de PVC com 0,05 m de diâmetro e um cano de PVC com 0,04 m de diâmetro. Essas tubulações foram cortadas e acopladas (tubulação de 0,04 dentro da tubulação de 0,05 m) para segurar a amostra, após ser inserida dentro do lisímetro.

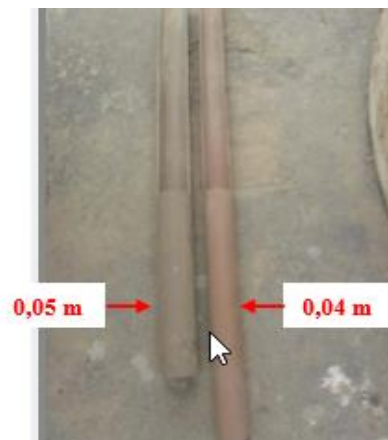
Figura 12 - Local de coleta de massa de resíduos nos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).



Figura 13 - Tubulação utilizada para a coleta da massa de resíduos.



Fonte: Silva (2013).

Vale ressaltar que, no primeiro momento de coleta, ou seja, dia 10 de março/2014, só foi possível a retirada de material no Lisímetro 03, haja vista que as aberturas dos “caps” na parte interna dos Lisímetros 01 e 02 estavam bastante fechadas (entupidas), não sendo possível introduzir as tubulações coletoras para retirar o material.

De certa forma este inconveniente apresentou um certo impacto nos resultados, haja vista, não ser possível uma comparação nesta profundidade com os dados dos outros lisímetros, principalmente, com o L02 que também apresentou uma grande produção de lixiviado na base.

Na Figura 14 pode-se ver o detalhe da amostra coletada na base do Lisímetro 03. A amostra apresentava uma característica pastosa, assim como se verificou uma grande produção de líquido no momento de sua retirada.

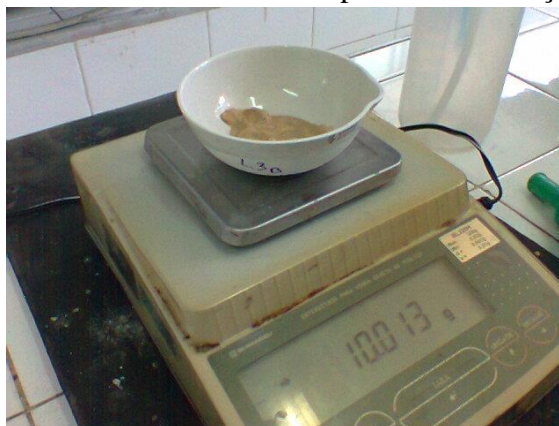
Figura 14 - Amostra da massa de resíduo coletada no Lisímetro 03 em 10/03/2014.



Fonte: Autor (2015).

No laboratório, as massas de resíduos foram devidamente pesadas e diluídas, de forma que pudessem ser viabilizadas as análises físico-químicas. Essas práticas podem ser vistas nas Figuras 15 e 16.

Figura 15 - Pesagem das amostras de massas de resíduos para caracterização físico-química.



Fonte: Autor (2015).

Figura 16 - Diluição da massa de resíduos para a caracterização físico-química.



Fonte: Autor (2015).

No segundo momento de coleta de massas de resíduos (junho de 2014) foi utilizado um trado como mecanismo de remoção através do topo de cada lisímetro, conforme demonstrado na Figura 17.

Figura 17 - Trado utilizado para a coleta da massa de resíduo através do topo dos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

Para a utilização do trado, foi necessária a entrada nos lisímetros e a rotação do parafuso acoplado ao mesmo, de forma que a cobertura inicial fosse removida e se tivesse acesso direto aos resíduos. Na Figura 18 é possível verificar o momento de uso dessa ferramenta na camada de cobertura dos lisímetros, e na Figura 19 pode-se ver o local de coleta após o término da abertura por rosqueamento.

Tal procedimento pode ter influenciado de certa forma nos resultados, principalmente, se comparado com a retirada da biomassa na base, haja vista que, nesta, existia um forte conexão com o lixiviado e a biomassa apresentava uma aparência mais pastosa, com forte tendência de degradação. Entretanto, tal procedimento foi necessário para se o comparativo e a pormenor discussão entre os valores alcançados para os três lisímetros.

Figura 18 - Remoção da camada superior, pelo trado, para a coleta da massa de resíduos.



Fonte: Autor (2014).

Figura 19 - Detalhe da abertura para a coleta da massa de resíduos.



Fonte: Autor (2015).

Após a coleta dos resíduos nos três lisímetros, as amostras foram levadas ao LABOSAN, para a realização dos procedimentos analíticos. Nas Figuras 20 e 21 podem-se ver detalhes das três amostras, quando da chegada ao laboratório e após o procedimento de diluição, respectivamente.

Figura 20 - Detalhe das massas de resíduos coletadas.



Fonte: Autor (2015).



Figura 21 – Amostras de massas de resíduos, após a diluição.



Fonte: Autor (2015).

### 3.5.3 Avaliação do recalque da massa de lixo

Foi realizado também na pesquisa, o procedimento para a avaliação do recalque da massa de resíduos. Tal prática consiste na utilização de fita métrica, sendo feita a medição do rebaixamento das camadas de cobertura dos lisímetros.

Salienta-se que, quanto maior for o processo de biodegradação, mais intenso será o processo de transformação da massa antes compactada em efluentes e gases, e, dessa forma, maior será o recalque. Pela Figura 22 pode-se observar mais detalhadamente como foi feita a medição do recalque da massa de resíduos dentro de cada lisímetro.

Figura 22 - Medição do recalque da massa de lixo nos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

### 3.5.4 Monitoramento da Composição do Biogás

Para medição da composição dos gases gerados nos lisímetros, foi utilizado um aparelho modelo GEM5000 da LANDTEC. As leituras foram programadas para um intervalo de 45 dias, de forma a verificar a possibilidade de variação nas concentrações dos gases gerados por conta de um maior decurso de tempo.

Por meio desse equipamento foram realizadas leituras simultâneas das porcentagens volumétricas de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ , além da temperatura interna e da pressão dos gases.

Os meses em que foram feitas leituras nos lisímetros se reportam a fevereiro/2014, março/2014, maio/2014 e junho/2014. Na Figura 23 se percebe o momento das medições dos gases gerados nos lisímetros.

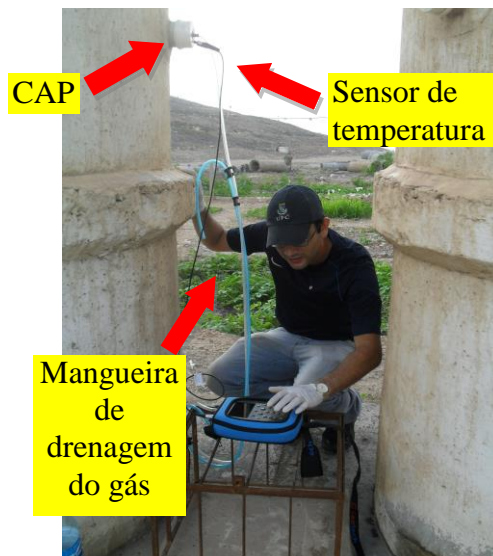
Figura 23 - Detalhe da utilização do equipamento de medição da composição dos gases.



Fonte: Autor (2015).

O aparelho foi acoplado ao dreno por meio de “cap”, de forma que fosse vedada a passagem de gases. O equipamento dispõe de um conector com mangueira para a passagem dos gases até o aparelho, bem como de um sensor acoplado, de forma a permitir a medição da temperatura interna nos lisímetros (Figura 24).

Figura 24: Detalhe da conexão do equipamento aos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

Na Tabela 10 se percebe os parâmetros analisados, assim como os tempos de medição, purga e intervalos de coleta enquanto que, na Tabela 11 verifica-se a forma como os dados foram dispostos em planilha eletrônica para a avaliação e compilação após a transferência do equipamento para o computador

Tabela 10 - Detalhe da sistemática de medição dos gases nos lisímetros.

Tempo de ensaio (min)	Tempo de Purga do Biogás	Intervalo de coleta dos dados	Parâmetros Analisados
0-5	30 segundos	1 minuto	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Concentração dos gases (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S);</li> <li>• Temperatura;</li> </ul>
5-60	1 minuto	5 minutos	
60-120	1 minuto	10 minutos	
120-180	1 minuto	15 minutos	

Fonte: Adaptado de Silva (2013).

O procedimento de medição dos gases encontra-se descrito a seguir:

- **Primeiros 5 minutos:** Leitura da composição dos gases gerados em cada minuto, sendo utilizado um intervalo de 30 segundos de pausa entre as leituras e 30 segundos para purga de forma a fechar ciclo de 5 minutos;
- **Primeira hora (60 minutos):** Leitura da composição dos gases gerados, com intervalo de 5 minutos entre as análises, até fechar o ciclo da 1ª hora de leitura nos lisímetros. Foi utilizado um tempo de 60 segundos para a purga dos gases e de 4 minutos de pausa do equipamento;
- **Segunda hora (120 minutos):** Leitura da composição dos gases gerados, com intervalo de 10 minutos entre as análises até fechar o ciclo da segunda hora de leitura nos lisímetros. Foi utilizado um tempo de 60 segundos para a purga dos gases e de 9 minutos de pausa do equipamento;
- **Terceira hora (180 minutos):** Leitura da composição dos gases gerados, com intervalo de 15 minutos entre as análises até fechar o ciclo da 3ª hora de leitura nos lisímetros. Foi utilizado um tempo de 60 segundos para a purga dos gases e 14 minutos de pausa do equipamento.

Para medição da composição dos gases conforme metodologia descrita acima, foi utilizada a captura no entorno da base e do meio dos lisímetros, haja vista que o intenso recalque da biomassa não permitiu que o topo permanecesse preenchido por resíduos e, dessa forma, não possibilitando uma avaliação da composição do biogás naquela profundidade.

De forma complementar aos dados obtidos para o meio e a base de cada lisímetros, foi efetuado, também, uma leitura simples, ou seja, uma leitura direta da composição dos gases no bocal de saída, acima da camada de cobertura da massa de resíduos (Figura 25). A medição ocorreu para verificar a existência de uma possível relação entre a concentração dos gases nas profundidades dos lisímetros (topo, meio e base) sendo esta, efetuada no período de março a abril de 2014.



Figura 25 - Medição dos gases no bocal de saída acima da camada de cobertura nos lisímetros.



Fonte: Autor (2015).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Lixiviado

Na realização do monitoramento do lixiviado foram efetuadas análises de parâmetros físico-químicos e bacteriológicos, os quais são discutidas com base na Resolução Conama nº 357/2005 (BRASIL,2005), complementada pela Resolução Conama nº 430/2011 (BRASIL 2011), que estabelecem as condições e padrões de lançamento de efluentes em corpos hídricos.

Vale ressaltar que, durante o procedimento para a determinação de algumas análises físico-químicas, as amostras tiveram que ser diluídas, haja vista que, por encontrarem-se muito concentradas, não seria possível o alcance dentro do limite de detecção pelo método utilizado.

Para o período de monitoramento entre os meses de janeiro, fevereiro, abril e junho de 2014, foram obtidos os dados representados pela Tabela 11. Estes, se referem à quantificação dos lixiviados coletados no Lisímetro 03 (100% material orgânico) e no Lisímetro 02 (50% material orgânico e 50% como os resíduos chegam ao aterro). Quanto ao Lisímetro 01 (100% como chegam ao aterro), não houve produção significativa de lixiviado durante o período de monitoramento que possibilitasse a sua coleta para análise.

Vale ressaltar que Silva (2013) realizou o monitoramento do lixiviado nos mesmos lisímetros no período de outubro/2012 a julho/2013 e justificou que a precipitação ocorrida naquele período favoreceu a decomposição da fração orgânica da massa de resíduos, algo em torno de 10% do total, contribuindo, portanto, para a geração de efluente.

Possivelmente, a baixa produção de lixiviado no momento da coleta deve-se ao fato de não se ter um período de chuvas intensas no ano de 2014, estando cerca de 24% abaixo da média histórica do Ceará, conforme demonstra levantamento realizado pela FUNCEME (2014).

Outra possibilidade pela ausência de lixiviado se refere ao fato da massa de resíduos já permanecer há quase dois anos nos lisímetros, ou seja, o enchimento dos lisímetros ocorreu em maio/2012.

Quanto ao Lisímetro 01 (100% na forma que chegam ao aterro) a total ausência de efluente se justifica pelo fato da pouca permanência de frações orgânicas, e sim, a predominância de materiais inorgânicos dificultando a atividade metabólica dos microorganismos durante o processo de biodegradação. Reforça-se que a concentração de compostos orgânicos no L03 e no L02 durante o preenchimento dos lisímetros é bem mais significativas.

Por conta da dificuldade do processo degradativo no L01, devido à forte presença de frações inorgânicas (cadeias poliméricas mais complexas) a possível produção de líquidos teria ocorrido pela presença do percolado em si, entretanto, as precipitações que ocorreram não foram significativas para a produção de efluente.

Tabela 11 - Resultados das análises físico-químicas e bacteriológicas do lixiviado gerado nos lisímetros L02 e L03. 2014.

Parâmetros	L03				L02			
	Janeiro	Fevereiro	Abril	Junho	Janeiro	Fevereiro	Abril	Junho
Cor Aparente (uH)	259	274	278	255	238	240	485	100
Turbidez (NTU)	207	188	121	143	19	80	40	7
pH	5,77	6,13	5,93	7,54	7,26	7,19	6,81	7,5
Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	18400	14680	85180	78900	5450	5460	25380	75880
Amônia (mg/L)	2494,8	2667	2321,2	29834	348,6	252	190,4	4844
Nitrito (mg/L)	1,17	8,69	0,81	15,55	31,6	0,87	0,42	16,45
Nitrato (mg/L)	6,77	7,21	6,74	8,15	11,5	25,3	5,5	12,4
Cloretos (mg/L)	8566,1	8139,32	3374,84	1389,64	2531,1	2858,7	178,668	198,52
DQO (g/L)	74,5	136,87	117,06	4,4511	17,62	61,84	75,32	4,52
Sólidos Totais (mg/L)	1012,66	1120,06	938,3	931,58	999,2	1175,36	930,22	919,72
Sólidos Fixos (mg/L)	77,68	37,14	30,36	5,12	5,22	9,5	8,84	3,4
Sólidos Voláteis (mg/L)	934,98	1082,92	907,94	926,46	994,0	1165,86	921,38	916,32
Fósforo (mg/L)	23,46	23,59	21,30	21,3	20,9	21,59	22,06	21,92
Coliformes Totais NMP/100ml	7,54 x 10 <sup>5</sup>	8,4 x 10 <sup>5</sup>	2,42 x 10 <sup>6</sup>	64,4 x 10 <sup>4</sup>	2,187 x 10 <sup>6</sup>	1x10 <sup>5</sup>	2,42 x 10 <sup>6</sup>	248,9 x 10 <sup>4</sup>
E. Coli NMP/100ml	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	Ausente	3,1 x 10 <sup>4</sup>	3,0 x 10 <sup>4</sup>

Fonte: Autor (2015).

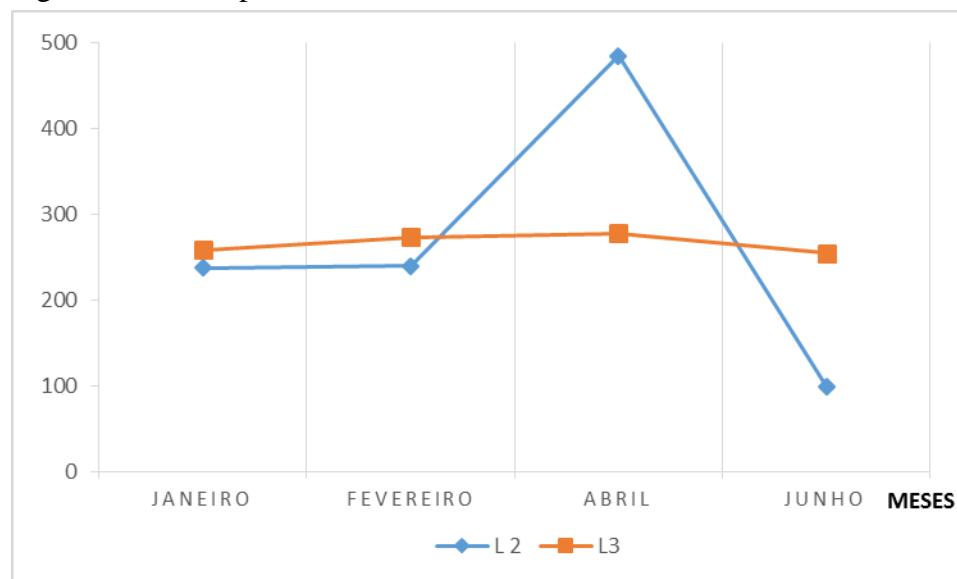
### 4.1.1 Cor

A cor aparente, conforme Silva (2013), está relacionada com a quantidade de sólidos em suspensão e, desta forma, associada ao grau de redução na penetração da intensidade luminosa em determinado meio aquoso. A redução de luz interfere na capacidade de reação dos seres biológicos fotossintetizantes, comprometendo, portanto, o equilíbrio entre matéria e energia de um determinado corpo hídrico.

Conforme Von Sperling (2005), a presença de sólidos dissolvidos no meio, de sais de ferro e de manganês, podem se vincular com a caracterização de cor em um determinado meio líquido, muito embora essa seja relacionada em termos de cor real, sendo diferenciada quanto a cor aparente por conta do procedimento de centrifugação e a decantação dos sólidos suspensos.

Na Figura 26 são apresentados os valores obtidos para a cor aparente das amostras coletadas de lixiviados pertencentes aos Lisímetros 02 e 03. Para as amostras em questão, foi realizada uma diluição, haja vista que a concentração de sólidos presentes, tanto dissolvidos quanto suspensos, encontrava-se bastante elevada, dificultando a detecção pelo equipamento fotocolorimétrico da amostra bruta.

Figura 26 - Cor Aparente nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano 2014.



Fonte: Autor (2015).

No período analisado, a concentração de cor para o Lisímetro 02 apresentou um valor máximo no mês de abril de 485 uH, e mínimo em junho, com valor de 100 uH. Para os meses de janeiro e fevereiro, as concentrações foram de 238 uH e 240 uH, respectivamente.

Já no Lisímetro 03, o valor máximo obtido foi de 278 uH, também no mês de abril, ao passo que o mínimo registrado foi de 255 uH, também no mês de junho. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores foram de 259 uH e 274 uH, respectivamente.

Foram determinadas médias de cor em 265,8, uH, para o Lisímetro 02, e de 266,5 uH, para o Lisímetro 03. Ressalta-se que os valores constantes da figura encontram-se acima de 75mg/Pt/L que, conforme Bassani (2010) e Brasil (2005) estão fora dos padrões estabelecidos na legislação pertinente, e de certa forma, a depender da vazão do manancial se comparada a e vazão do lixiviado produzido pelos lisímetros, podem comprometer seriamente as reações biológicas envolvidas em um recurso hídrico.

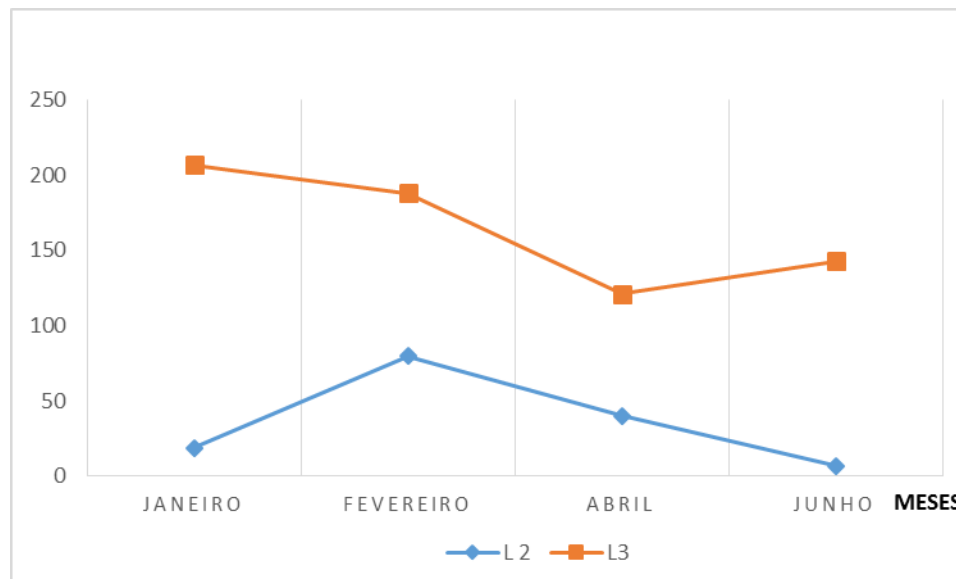
#### **4.1.2 Turbidez**

A turbidez em um determinado meio aquoso está relacionada à presença de sólidos suspensos, podendo afetar a taxa de absorção da energia luminosa e comprometer as reações biológicas em um ecossistema hídrico.

Na Figura 27 são apresentados os valores determinados para turbidez nas amostras coletadas nos Lisímetros 02 e 03. O método utilizado no procedimento foi o nefelométrico e, assim como para o parâmetro cor, não foi possível a detecção total dos valores em amostra bruta, sendo adotada, portanto, a mesma taxa no fator de diluição.

Dentre os valores encontrados para o Lisímetro 02, observa-se que ocorreu um valor máximo de turbidez no mês de fevereiro, com a concentração de 80 NTU. O valor mínimo foi determinado em junho, com valor de 07 NTU. Para os meses de janeiro e abril, as concentrações foram de 19 NTU e 40 NTU, respectivamente.

Figura 27 - Turbidez dos lixiviados nos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Para o Lisímetro 03, o valor máximo de turbidez obtido foi de 207 NTU, no mês de janeiro, enquanto o valor mínimo foi de 121 NTU, no mês de abril. Para os meses de fevereiro e junho, os valores registrados foram de 188 NTU e 143 NTU, respectivamente.

Foi determinada uma média de 36,5 NTU para o Lisímetro 02 e de 164,75 NTU para o Lisímetro 03. Diferentemente dos valores encontrados para cor, a média de turbidez para os dois lisímetros encontram-se com valores mais amplos, sendo a diferença de, aproximadamente, 128,25 NTU entre os mesmos.

Vale salientar que as amostras do Lisímetro 02 apresentavam uma coloração “alaranjada”, o que, de acordo com Esteves (2012), está relacionado com a presença de compostos húmicos caracterizados por suas complexas cadeias poliméricas.

A possível presença de compostos recalcitrantes em maior concentração no lixiviado do L02, em relação ao L03, deve-se ao fato de que neste último, o preenchimento ocorreu somente com material orgânico, sendo, portanto, mais facilmente biodegradável.

Ressalta-se, também que, de forma visual, sem o uso de qualquer equipamento, já era possível a constatação de uma maior concentração de sólidos suspensos nas amostras do L03, os quais influenciaram diretamente na turbidez do meio.

Mesmo que não tenha ocorrido a centrifugação das amostras para a detecção de cor, o fato da elevada concentração de compostos húmicos, possivelmente já iria interferir significativamente na distorção da radiação, propiciando os altos valores obtidos, mesmo com a diluição.

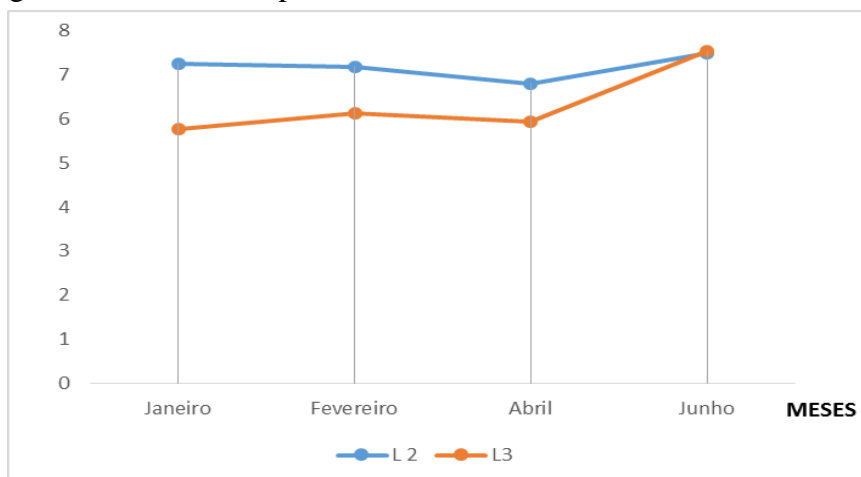
Reforça-se que o lisímetro L02 foi preenchido com 50% dos resíduos na forma que chegam ao aterro e esta fração pode ser responsável pelos desdobramentos de alguns compostos húmicos, haja vista a presença de materiais mais recalcitrantes, como papéis e plásticos dentro do lisímetro, as quais apresentam em suas características complexas cadeias poliméricas.

### 4.1.3 pH

Na Figura 28 são apresentados os valores de pH correspondentes aos Lisímetros 02 e 03. De acordo com Mota (2012), o pH representa o equilíbrio entre os íons  $H^+$  e  $OH^-$ , indicando se o meio apresenta características ácidas, neutras ou básicas.

Para um correto equilíbrio entre reações na vida aquática é recomendável a presença de pH na faixa de 6 a 9, conforme Brasil (2005). O lançamento de efluentes com valores acima ou abaixo do limite permitido em legislação poderá apresentar significativo impacto negativo em um determinado recurso hídrico comprometendo tanto a flora quanto a fauna do ecossistema.

Figura 28 - Valores de pH nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Dentre os valores encontrados para o Lisímetro 02, o valor máximo obtido de pH corresponde ao mês de junho, com valor de 7,5. O valor mínimo ocorreu em abril, na faixa de 6,8. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 7,2 nos dois meses.

Quanto ao Lisímetro 03, o valor máximo obtido de pH ocorreu no mês de junho estando igual a 7,5. O valor mínimo foi determinado em abril na faixa de 5,9. Nos meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 5,7 e de 6,1, respectivamente.

Determinou-se um valor médio de pH em 7,2 para o Lisímetro 02 e de 6,3 para o Lisímetro 03. Verifica-se que os valores obtidos para o Lisímetro 02 e para o Lisímetro 03 apresentaram-se basicamente com o mesmo comportamento, ou seja, demonstrando certa estabilidade, indicando que, para este parâmetro em particular, os danos ao meio ambiente seriam menos expressivos, por conta de que não houve uma variação brusca, assim como se encontraram próximos à neutralidade.

Quanto aos valores encontrados para o L03, os mesmos estiveram abaixo do encontrado para o L02, possivelmente devido a forma de preenchimento daquele lisímetro, portanto, com a ocorrência de uma intensa degradação dos compostos orgânicos e a formação de ácidos graxos.

Os valores encontrados de pH estão diretamente relacionados com o potencial de digestão dos resíduos, haja vista que, conforme Eduardo (2007), quando os valores estão próximos da neutralidade se tem uma faixa ótima para o crescimento das bactérias, para as atividades enzimáticas e a solubilidade de compostos.

Silva (2013) durante o monitoramento dos lisímentros, encontrou valores de pH nas faixas do neutro a básica, no período chuvoso, ou seja, de janeiro a julho de 2013, tendo seus valores se reportado como uma tendência normal, pelo fato da degradação da matéria orgânica estar situada em uma fase metanogênica de degradação, ou seja, com atividade metabólica mais estável e com uma menor incidência de ácidos graxos.

De acordo com o período da Figura 28, os valores foram correspondente ao de Silva (2013), ou seja, estiveram entre a neutralidade e a faixa ácida sendo possivelmente afetados diretamente com a intensidade de chuvas, haja vista que o mês de abril, o qual apresentou maior intensidade de chuvas, houve intensa lixiviação, assim como a degradação da matéria orgânica e consecutivamente a formação de ácidos graxos.



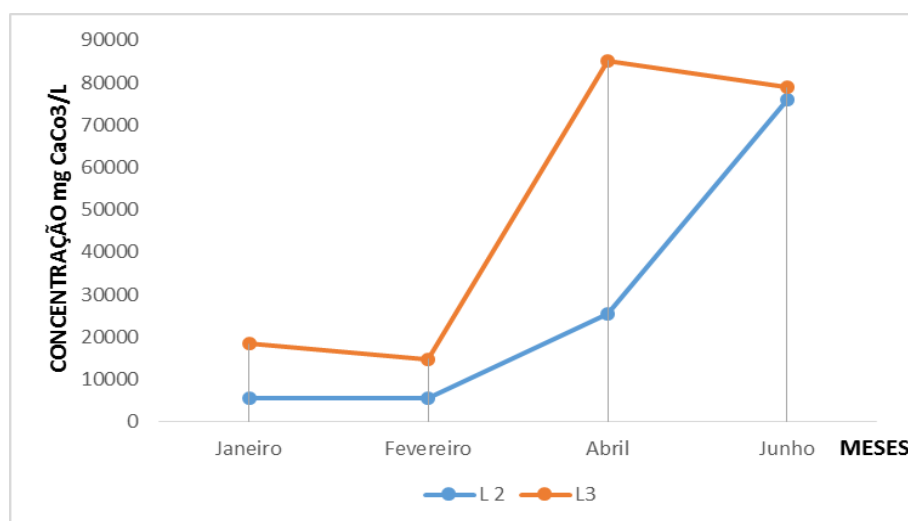
Vale salientar que, de outubro a dezembro de 2013, praticamente não houve a ocorrência de chuvas na região dos lisímetros; sendo assim, os valores obtidos em termos de pH para janeiro e fevereiro de 2014 foram praticamente constantes.

#### 4.1.4 Alcalinidade

A alcalinidade está relacionada com a capacidade da água em neutralizar os ácidos presentes no meio. Na faixa usual de pH, próxima à neutralidade, a maior contribuição para a alcalinidade está relacionada à presença de bicarbonatos (VON SPERLING, 2005).

Na Figura 29 são apresentados os valores determinados para alcalinidade nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03.

Figura 29 - Valores de alcalinidade nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Para o Lisímetro 02, o valor máximo de alcalinidade refere-se ao mês de junho, igual a 75.880 mg/L. O valor mínimo foi determinado em abril, igual a 25.380 mg/L. Nos meses de janeiro e fevereiro, os valores foram de 5.450 mg/L e de 5.460 mg/L, respectivamente.

Para o Lisímetro 03, o máximo valor obtido ocorreu em abril, igual a 85.180 mg/L. O valor mínimo ocorreu em fevereiro sendo de 14.680 mg/L. Nos meses de janeiro e junho, os valores obtidos foram de 18.400 mg/L e de 78.900 mg/L, respectivamente.

Foi determinada uma média de 28.042,5 mg/L para o Lisímetro 02 e de 49.290 mg/L para o Lisímetro 03. Conforme Bassani (2010), o processo da alcalinização está relacionado a um parâmetro que pode confirmar a metanização do lixiviado, ou seja, quanto maior for a degradação da matéria orgânica maior será a transformação em CO<sub>2</sub> e bicarbonatos.

Os elevados valores obtidos para alcalinidade, tanto para o L02 quanto para o L03, encontram-se relacionados com o processo de degradação da matéria orgânica. Vale salientar que os maiores valores da alcalinidade ocorreram nos meses de maiores precipitações, ou seja, abril e junho.

Para os maiores valores de alcalinidade, a precipitação influenciou diretamente no processo de lixiviação dos resíduos, bem como na degradação da matéria orgânica, com a produção de CO<sub>2</sub> e bicarbonatos. Com uma maior intensidade de degradação, maior será a produção de ácidos no meio, entretanto, os altos valores de alcalinidade influenciaram diretamente no sentido de não haver uma variação brusca do pH, estabelecendo-se, portanto uma faixa adequada para a atividade dos microrganismos decompositores.

Conforme Oliveira e Jucá (2004), na etapa da metanogênese ocorre um aumento na concentração de bactérias metanogênicas que degradam os ácidos graxos livres e de cadeia carbônica curta originados na acidogênese, promovendo a formação de metano e conseqüente elevação do pH e alcalinidade do percolado.

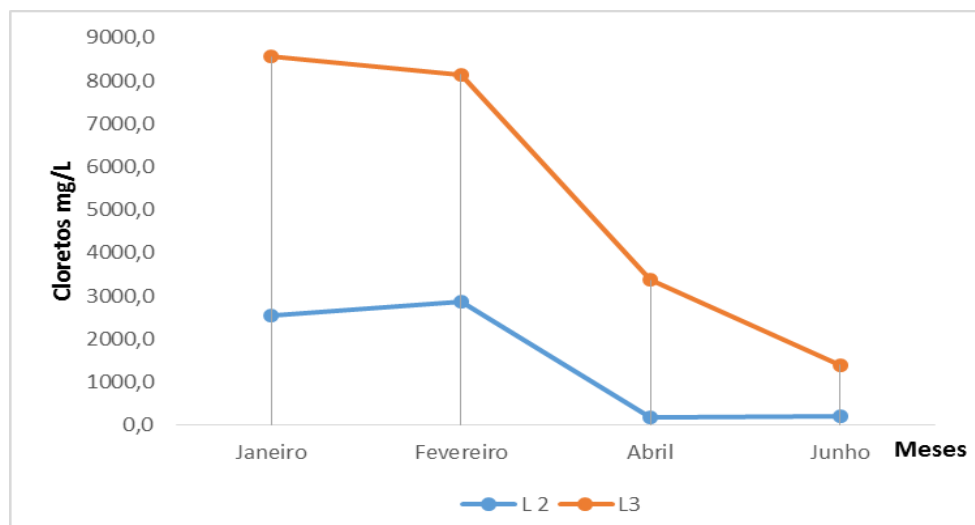
Para o caso dos valores encontrados, a faixa de pH encontrava-se com média próxima à neutralidade, e a alta alcalinidade foi a responsável pela sua manutenção. Desta forma, os lisímetros ainda encontram-se bastante ativos no processo de degradação, e não basicamente numa fase metanogênica, sendo a alcalinidade elevada a responsável pela manutenção da normalidade nos valores de pH.

#### **4.1.5 Cloretos**

A vantagem da determinação da presença de cloretos, conforme Catapreta (2008), deve-se ao fato de que são possíveis indicadores dos processos evolutivos que ocorrem dentro de um aterro sanitário. A ocorrência deste indicador se reporta à presença de sais minerais existentes no meio.

Na Figura 30 são apresentados os valores determinados para Cloretos nas amostras de lixiviados dos Lisímetros 02 e 03.

Figura 30 - Valores de cloretos nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Dentre os valores encontrados para o Lisímetro 02, o máximo obtido ocorreu no mês de fevereiro, com o valor em 2.858,7 mg/L. O valor mínimo foi determinado em abril, igual a 178,7 mg/L. Nos meses de janeiro e junho os valores obtidos foram de 2.531,1 mg/L e de 198,5 mg/L, respectivamente.

Quanto aos valores encontrados para o Lisímetro 03, o máximo determinado se refere ao mês de janeiro, com o valor de 8.566,1 mg/L, e o mínimo foi obtido em junho, com o valor de 1.389,6 mg/L. Já para os meses de fevereiro e abril, os valores obtidos foram de 8.139,2 mg/L e de 3.374,8 mg/L, respectivamente.

Foi determinada uma média de 1.441,8 mg/L, para o Lisímetro 02, e de 5.367,5 mg/L, para o Lisímetro 03.

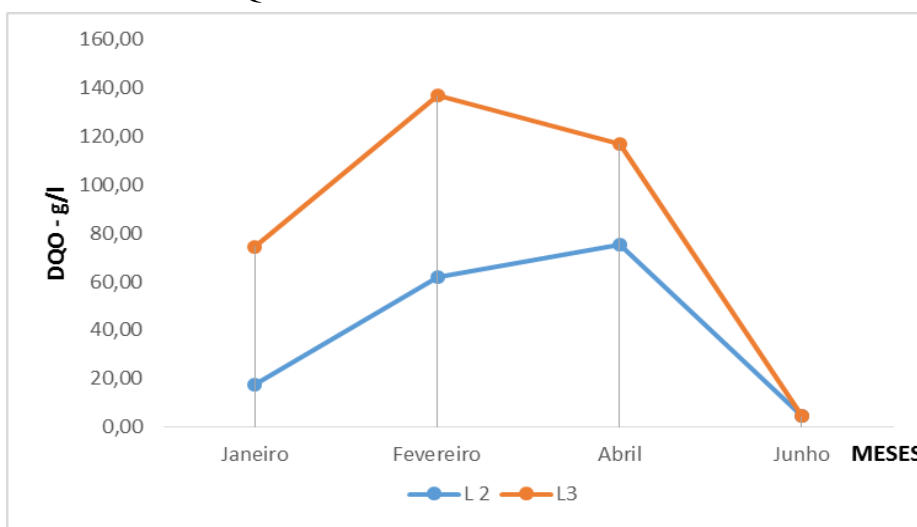
A baixa incidência de chuvas nos dois primeiros meses de monitoramento resultou na concentração de sais dentro dos lisímetros, entretanto, com o aumento das precipitações ocorreram percolações dentro dos mesmos e, desta forma, a diluição do lixiviado.

Mesmo com uma queda nos valores para os últimos meses, os mesmos encontraram-se em algum momento próximos ao descrito por Coelho (2005), que determinou a faixa de valores de cloretos para lixiviado de aterros sanitários de um modo geral entre 5.000 a 30.000 mg/L.

#### 4.1.6 DQO

A DQO é uma medida da concentração de compostos orgânicos em um determinado meio, sendo usado, para tal procedimento, um forte oxidante químico. Na Figura 31 são apresentados os valores alcançados para DQO nas amostras de lixiviados dos lisímetros 02 e 03.

Figura 31 - Valores de DQO nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2014).

Para Eduardo (2007), a análise de DQO propicia a determinação da quantidade de oxigênio consumida pela oxidação química da matéria orgânica presente na amostra de lixiviado. Desta forma, ao se ter elevadas concentrações de DQO, maiores serão os requisitos de oxigênio para suprir a demanda de degradação da matéria orgânica, podendo, de certa forma, causar desequilíbrios na vida aquática de um determinado recurso hídrico que venha a receber o lixiviado.

Para o Lisímetro 02, o máximo obtido ocorreu no mês de abril, com o valor de 75,32 g/L, e o mínimo foi determinado em junho, igual a 4,52 g/L. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 17,62 g/L e de 61,84 g/L, respectivamente.

Quanto ao Lisímetro 03, o valor máximo obtido se refere ao mês de fevereiro, igual a 36,87 g/L. O mínimo ocorreu no mês de junho, com valor igual a 4,45 g/L. Para os meses de janeiro e abril, os valores obtidos foram de 74,5 g/L e de 117,06 g/L, respectivamente.

Foram determinados valores médios de DQO iguais a 39,82 g/L, para o Lisímetro 02, e de 83,22 g/L, para o Lisímetro 03.

Conforme Dos Santos (2010), a possível variabilidade nos valores encontrados de DQO se deve ao fato de que, quando executado o procedimento de enchimento das células do aterro, a atividade biológica pode se estender por vários meses e as análises são realizadas em percolados de resíduos com diferentes idades, que podem variar durante o período de degradação.

Desta forma, por conta de ter decorrido um certo período desde o enchimento dos lisímetros é possível que se tenha uma variação nos percolados até por conta da idade da massa de resíduos, e com isso uma relação com a modificação nos valores de DQO alcançados após cada leitura.

Para o caso dos lisímetros, é natural a permanência de uma variação na percolação e nos valores de DQO, justamente por seu formato e a metodologia de implantação, haja vista a presença de diferentes particularidades nas camadas de resíduos por profundidade.

Quanto aos altos valores obtidos para a DQO nos lixiviados dos lisímetros, Catapreta (2008) afirma ter encontrado valores entre 45 g/L e 120 g/L, sendo isso possível, por conta das características dos líquidos nos resíduos, pois em aterros novos há disponibilidade de matéria orgânica facilmente biodegradável.

Conforme os dados obtidos pode-se perceber que os lisímetros ainda se encontram bastante ativos na degradação dos resíduos sólidos, muito embora, o preenchimento tenha ocorrido em maio/2012.

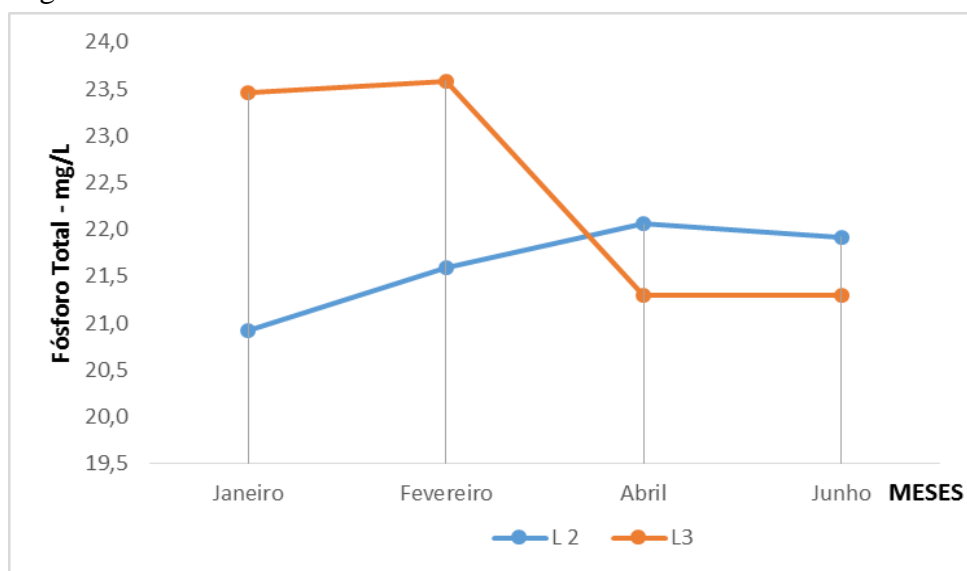
Uma razão para os valores encontrados no Lisímetro 03 terem sido maiores deve-se a sua composição, tendo portanto, uma maior quantidade de material orgânico, contribuindo para a alta concentração de DQO. Percebe-se que as maiores concentrações foram observadas nos períodos com menos incidência de chuvas, pelo fato de que, quando da ocorrência da precipitação, a diluição do lixiviado era mais incisiva, assim como o carreamento de frações de sólidos totais.

#### 4.1.7 Fósforo

A importância da presença de fósforo reside no fato dele ser, assim como o nitrogênio, um dos macronutrientes essenciais ao processo energético dos seres vivos e um fator limitante para as suas atividades metabólicas. Para autores como Bassani (2010), a sua excessiva presença, porém, pode trazer transtornos, como a poluição de recursos hídricos.

Na Figura 32 são apresentados os valores determinados para o fósforo nas amostras dos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03.

Figura 32 - Valores de fósforo nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015);

Para o Lisímetro 02, o máximo obtido foi no mês de abril, com o valor de 22,6 mg/L, enquanto que o mínimo valor ocorreu em janeiro, igual a 20,9 mg/L. Para os meses de fevereiro e junho, os valores obtidos foram de 21,59 mg/L e de 21,92 mg/L, respectivamente.

Para o Lisímetro 03, o máximo valor, 23,59 mg/L, foi determinado no mês de fevereiro, e o mínimo ocorreu em abril e junho, com o valor de 21,3 mg/L. No mês de janeiro de 2014, foi determinado o valor de 23,46 mg/L.

Os valores médios determinados foram iguais a 21,6 mg/L, para o Lisímetro 02, e a 22,41 mg/L, para o Lisímetro 03.

Diferentemente do ocorrido com a DQO, foi constatado em termos de fósforo uma queda na concentração no Lisímetro 03, nos meses de maior incidência de chuvas, ao passo que, para o L02 os valores foram maiores nesse período, possivelmente porque a atividade metabólica e a diluição do chorume com o percolado atuaram mais incisivamente no L03.

Quando comparado com os valores de cloretos, para o L03 verificam-se maiores concentrações nos meses de menor incidência de chuvas, indicando a possibilidade de uma possível interferência do percolado na diluição do chorume, bem como nos valores concentrados de macronutrientes e sais minerais.

Mesmo tendo ocorrido um acréscimo de valores no Lisímetro 02, a variação do valor mínimo para a média foi de apenas 0,7mg/L, que pode ter sido ocasionado por conta do arraste, pelo percolado, de algum componente da fração inorgânica existente no Lisímetro 02.

Para o L03, com a diminuição da DQO, pode-se verificar que os valores de fósforo também diminuíram; isto se deve ao fato de que, com a degradação da matéria orgânica e a diminuição da DQO, foi necessária uma maior utilização de fósforo pelos microrganismos decompositores, haja vista ser este um macro nutriente essencial para as suas atividades metabólicas.

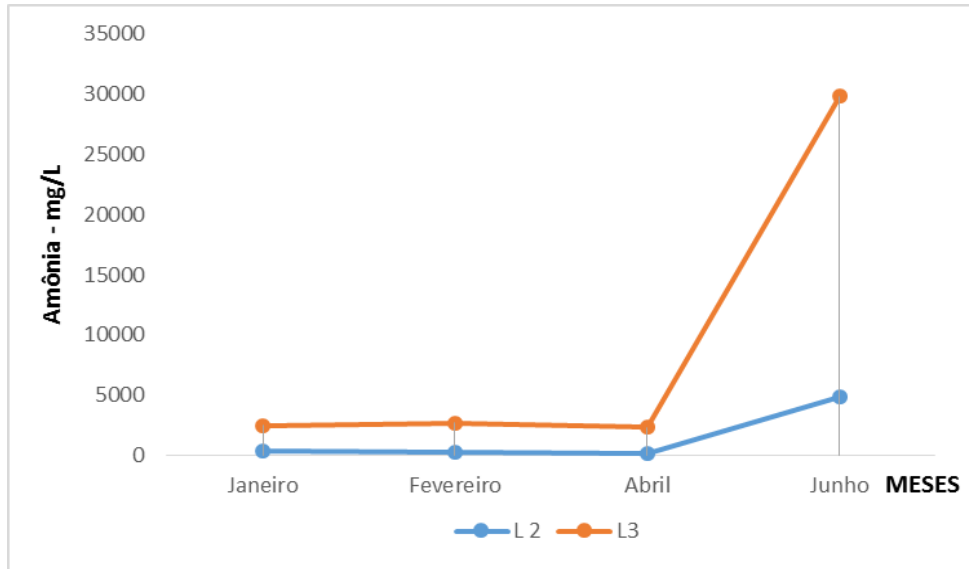
#### **4.1.8 Séries nitrogenadas (amônia, nitrito e nitrato)**

De acordo com Mota (2012), o nitrogênio pode estar presente na água sob várias formas, como: molecular, amônia, nitrito e nitrato; é caracterizado por ser um elemento indispensável aos microrganismos, pois, assim como o fósforo, serve como macro nutriente essencial para os requisitos energéticos durante atividade metabólica.

Conforme Silva (2013), a decomposição da matéria orgânica possibilita a transformação do nitrogênio orgânico em nitrogênio amoniacal, e, por último, em nitrato. Desta forma, a variação da concentração entre cada composto nitrogenado pode servir como base para conhecimento dos estágios da degradação da matéria orgânica.

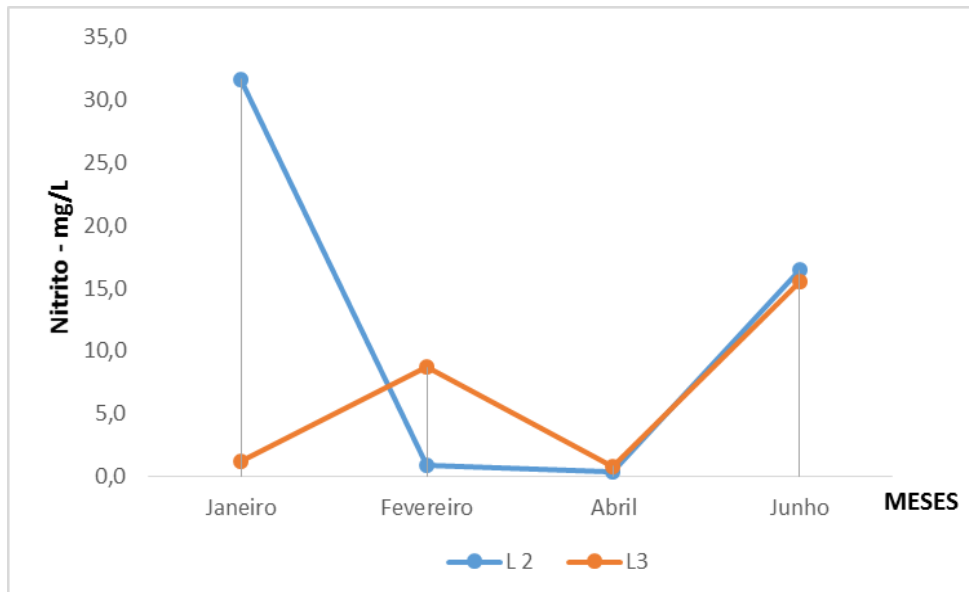
Nas Figuras 33, 34 e 35 são apresentados os valores determinados para as frações nitrogenadas - amônia, nitrito e nitrato.

Figura 33 - Valores de amônia nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

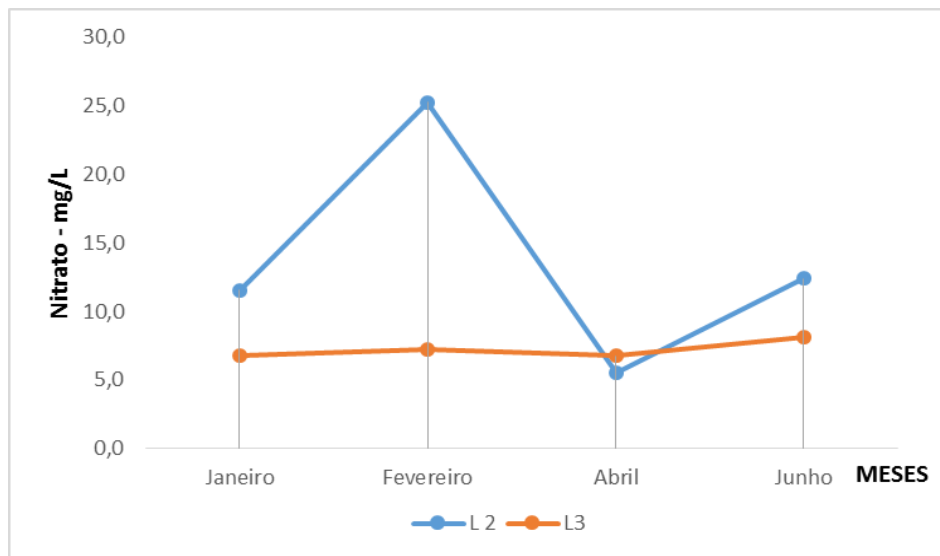
Figura 34 - Valores de nitrito nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).



Figura 35 - Valores de nitrato nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Os valores determinados para amônia no Lisímetro 02 tiveram um máximo no mês de junho, alcançando 4.844 mg/L, e um mínimo em abril, com o valor de 190,4 mg/L. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 348,6 mg/L e 252 mg/L, respectivamente.

Quanto aos valores de amônia no Lisímetro 03, o máximo ocorreu em junho, com o valor de 29.834 mg/L, e o mínimo foi determinado em abril, igual a 2.321,2 mg/L. Para janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 2.494,8 mg/L e 2.667 mg/L, respectivamente.

Foram determinados valores médios de 1.408,75 mg/L, para o Lisímetro 02, e de 9.329,25 mg/L, para o Lisímetro 03.

Para Melo (2003), as concentrações de amônia ocorrem por conta da própria decomposição da matéria orgânica, quando as proteínas existentes na fração orgânica dos resíduos são convertidas diretamente pela ação das bactérias, em condições anaeróbias ou aeróbias.

De acordo com Oliveira e Mota (1998), os valores elevados para a amônia devem-se ao fato de ocorrer a degradação biológica de aminoácidos e outros compostos nitrogenados durante a fase acetogênica.

Conforme Giordano (2003), as concentrações de amônia podem interferir de alguma forma nos processos de tratamento do lixiviado em um aterro sanitário, devido a sua solubilidade, o que dificulta a sua remoção em uma única etapa de tratamento.

No Lisímetro 02, o valor máximo de nitrito foi determinado no mês de janeiro, alcançando 31,6 mg/L, e o mínimo, em abril, com o valor de 0,42 mg/L. Já para os meses de fevereiro e junho, os valores obtidos foram de 0,87 mg/L e 16,45 mg/L, respectivamente.

No Lisímetro 03, o valor máximo de nitrito foi medido no mês de junho, com 15,5 mg/L, e o mínimo em abril, com 0,81 mg/L. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores foram de 1,17 mg/L e 8,7 mg/L, respectivamente. Foi determinado um valor médio de nitrito igual a 12,3 mg/L para o Lisímetro 02, e de 6,6 mg/L para o Lisímetro 03.

Observa-se que o nitrito apresentou um comportamento de variação, tanto no lisímetro 02 quanto no lisímetro 03, verificando-se picos de ascensão, como também de queda de valores. Tal característica apresenta-se como uma singularidade do nitrito ao ser um elemento de transição, tanto para a forma de amônia como para o nitrato.

Para a série de Nitrato, o valor máximo encontrado para o Lisímetro 02 foi de 25,3 mg/L, em fevereiro, e o mínimo ocorreu em abril, com 5,5 mg/L. Nos meses de janeiro e junho, os valores obtidos foram de 11,5 mg/L e 12,4 mg/L respectivamente.

Quanto ao Lisímetro 03, o valor máximo de nitrito foi determinado em junho, igual a 8,1 mg/L, e o mínimo em abril, com 6,7 mg/L. Nos meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de 6,7 mg/L e de 7,2 mg/L, respectivamente.

Foram determinados valores médios de nitrato iguais a 13,7 mg/L, no Lisímetro 02, e a 7,2 mg/L, no Lisímetro 03.

Quanto aos valores de nitrato, nota-se que para os meses de janeiro e fevereiro foi constatada uma tendência de aumento no L02, sendo um indicativo de que a degradação da matéria orgânica já se encontrava num estágio mais avançado. A queda de valores ocorrida em abril pode ter sido influenciada por conta da precipitação pluviométrica ser mais intensa nesse mês, favorecendo, portanto, a diluição da massa de resíduos e alterando o processo de degradação.

Podem-se perceber valores muito mais acentuados para amônia do que para nitrito e nitrato. Vale ressaltar que, para tal análise, foi necessária a realização de uma diluição de 50 vezes do volume da amostra, com posterior reajuste nos valores, justamente por conta deste parâmetro se encontrar bastante concentrado e, se realizada análise de forma bruta, seria gasto grande quantidade de ácidos para a sua titulação até o valor de detecção.

Possivelmente, o fato de a diluição ter ocorrido possa ter influenciado nos valores alcançados, entretanto, pela observação da alta concentração, percebe-se o quanto o material orgânico residente encontrava-se bastante ativo em termos de processo de degradação conforme o descrito por Oliveira e Mota (1998).

Muito embora os valores em termos de Amônia se encontrarem bastante elevados, o mesmo pode ser verificado em outros autores como Eduardo (2007) que apresentou valores para o lixiviado tratado variando na faixa de 1294 mg/L a 1875 mg/L. Já Giordano (2003) verificou valores sempre na ordem da casa de  $10^3$  mg/L para o caso de lixiviado bruto.

De acordo com Eduardo (2007), altas concentrações de amônia no lixiviado acaba se tornando complicadora no processo de tratamento do mesmo, haja vista esta substância ter característica solúvel e desta forma mais difícil o tratamento em apenas uma única etapa. Segundo a mesma, o procedimento do *stripping* da amônia possivelmente seria uma das melhores opções para o tratamento destas elevadas concentrações.

Conforme Castilhos Jr. *et al.*, (2006), a amônia oriunda do material proteico dos RSU tende a ser recalcitrante ao processo de decomposição, haja vista que, ela é estável em condições anaeróbias, por conta que o processo de nitrificação, intermediado por microrganismos, acontece em condições aeróbias. Tal citação encontra-se relacionada com os valores observados, haja vista que, o processo de anaerobiose se torna bem mais incisivo na base dos lisímetros.

Para Liao *et al* (1995), o fato de se utilizar o ar para a remoção de amônia pode ser útil na remoção em lixiviado, embora esta tecnologia seja mais amplamente utilizada no tratamento de efluentes industriais, os quais apresentam baixas concentrações de nitrogênio.

Em termos de amônia, percebe-se uma tendência constante nos valores dos primeiros três meses monitorados, tanto para o L02 como para o L03, apresentando um pico de ascensão no mês de junho, como ocorrido para o nitrito e nitrato, indicando que a possível umidade na massa de resíduos, propiciada pela precipitação, tenha auxiliado o processo de degradação. Vale reforçar que a produção de líquidos se tornou mais expressiva nos meses de abril e junho.

Conforme Moura (2008), o nitrogênio amoniacal removido do lixiviado através do arraste com ar pode ser recuperado e usado na produção de fertilizantes nitrogenados e em outros processos industriais. Para a autora, os fertilizantes nitrogenados que podem ser produzidos são a uréia, o ácido nítrico, o nitrato de amônio, o sulfato de amônio, etc.

No caso do nitrato, no L03, retirando-se um pequeno aumento no mês de junho, percebe-se a tendência de um valor constante nos dados observados, o que indica certa maturidade deste parâmetro.

Ressalta-se que a amônia também apresentou uma tendência de valor constante neste lisímetro, destacando o fato de que a matéria orgânica, possivelmente, já se encontrava estabilizada e as variações ocorridas para este parâmetro se devem às influências de fatores externos, como temperatura, radiação solar e precipitação.

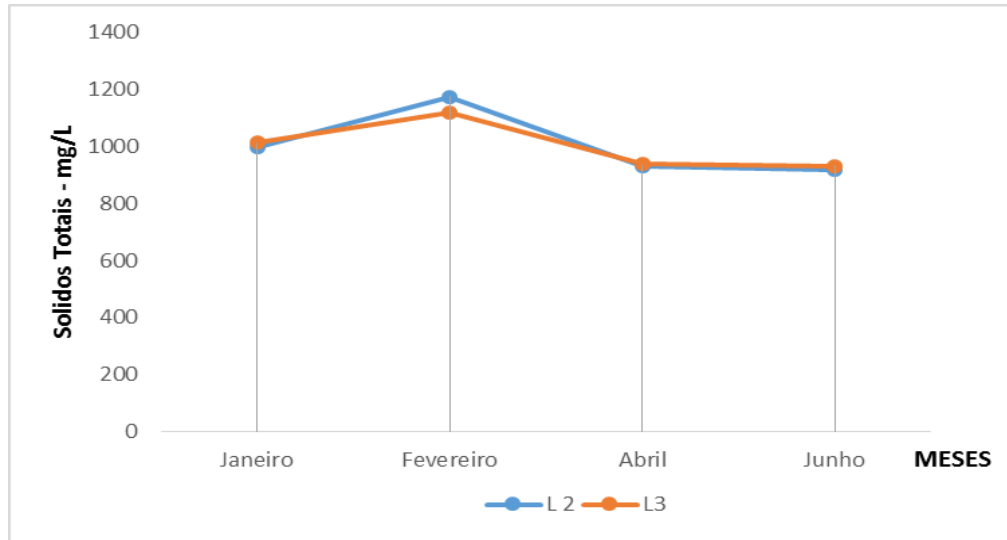
Para o L02, o teor de nitrato não apresentou uma uniformidade, possivelmente, por conta da composição dos resíduos de preenchimento do mesmo, ou seja, houve um acréscimo de valores nos meses mais secos.

#### **4.1.9 Frações de sólidos (totais, fixos e voláteis)**

A presença de frações de sólidos no lixiviado pode servir como base para a determinação da concentração de material orgânico existente. Dentre as frações de sólidos, a caracterização da fração orgânica é indicada pelo teor de sólidos voláteis. O teor de sólidos que permanece após a secagem em mufla é descrito como fixo, sendo caracterizado por compostos recalcitrantes ou de difícil degradação.

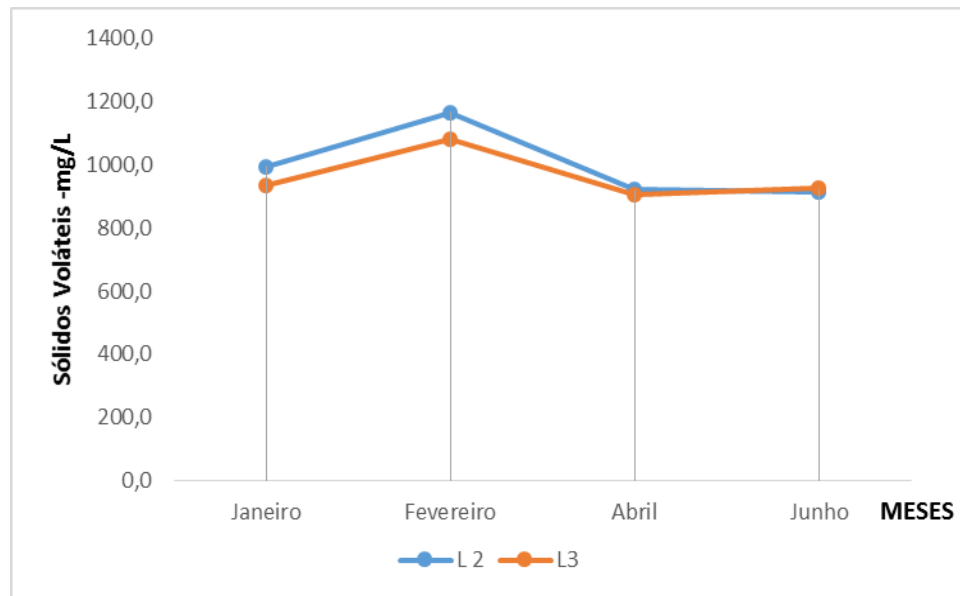
Nas Figuras 36, 37 e 38 são apresentados os valores alcançados para as frações de sólidos (totais, voláteis e fixos) nas amostras de lixiviados dos Lisímetros 02 e 03. Para Bassani (2010), as concentrações de sólidos totais em lixiviados de aterros sanitários podem variar de 2.000 mg/L a 60.000 mg/L.

Figura 36 - Valores de sólidos totais nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



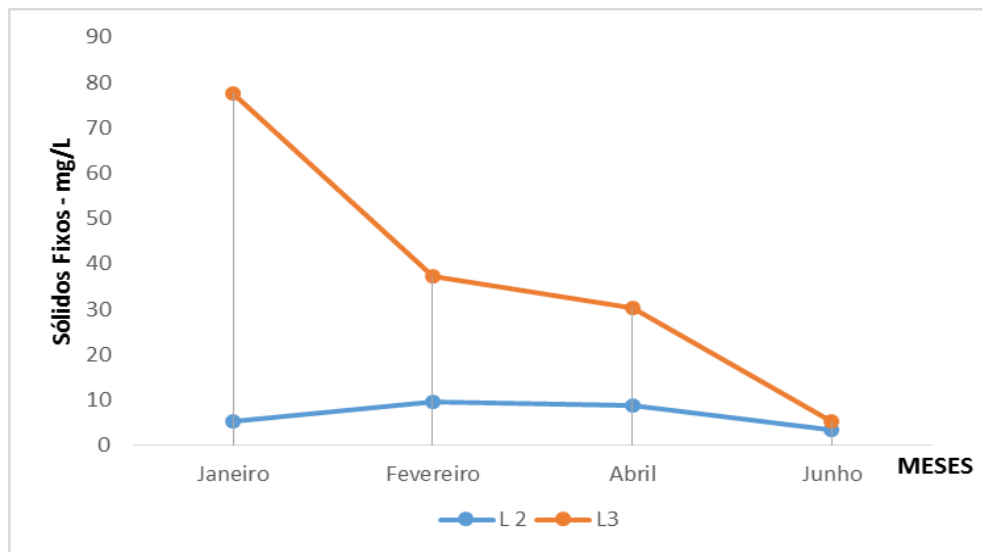
Fonte: Autor (2015).

Figura 37 - Valores de sólidos voláteis nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Figura 38 - Valores de sólidos fixos nos lixiviados dos lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Para a série de sólidos totais, os valores encontrados para o Lisímetro 02 alcançaram um valor máximo em fevereiro em 1.175,4 mg/L, e mínimo em junho, com 919,7 mg/L. Para os meses de janeiro e abril desse ano, os valores obtidos foram de 999,2 mg/L e 930,2 mg/L, respectivamente.

No lixiviado do Lisímetro 03, o máximo obtido foi, também, em fevereiro com 1.120,0 mg/L e o mínimo em junho igual a 31,6 mg/L. Nos meses de janeiro e abril, os valores obtidos foram de 1012,6 mg/L e 938,3 mg/L, respectivamente. O valor médio para este parâmetro foi igual a 1006,1 mg/L, para o Lisímetro 02, e a 1000,6 mg/L, para o Lisímetro 03.

Percebe-se um comportamento com tendência constante para o teor de sólidos totais, tanto no L02 quanto no L03, possivelmente, retratando um estágio de maturidade no processo de degradação da massa de resíduos, haja vista que os lisímetros já estão funcionando desde maio de 2012 favorecendo portanto, uma certa estabilidade.

Quanto aos sólidos voláteis, os valores encontrados para o Lisímetro 02 alcançaram um máximo no mês de fevereiro, igual a 1165,8 mg/L, e um mínimo em junho em 916,3 mg/L. Para os meses de janeiro e abril, os valores obtidos foram de 994,0 mg/L e 921,4 mg/L, respectivamente.

O máximo obtido para sólidos voláteis no Lisímetro 03 foi em fevereiro, com 1.082,9 mg/L, e o mínimo em abril, com 907,9 mg/L. Nos meses de janeiro e junho, os valores alcançados foram de 934,9 mg/L e 926,4 mg/L, respectivamente. Foi determinada um valor médio de 999,4 mg/L para o Lisímetro 02 e de 963,1 mg/L para o Lisímetro 03.

A fração volátil se caracteriza pela representação da fração orgânica. Para o caso do L02 e L03 os valores são bem próximos e representam uma importante fração dos sólidos totais indicando a forte presença desses compostos orgânicos dentro dos lisímetros mesmo após ter-se decorrido um certo tempo desde o enchimento com os resíduos sólidos.

Para os sólidos fixos, os valores encontrados para o Lisímetro 02 alcançaram um máximo no mês de fevereiro com 9,5 mg/L, e o mínimo em junho, com 3,4 mg/L. Para os meses de janeiro e abril, os valores obtidos foram de 5,22 mg/L e 8,84 mg/L, respectivamente.

No Lisímetro 03, o valor máximo de sólidos fixos ocorreu em janeiro, igual a 77,7 mg/L, e o valor mínimo em junho, com o valor de 5,1 mg/L. Para os meses de fevereiro e abril, os valores obtidos foram de 37,1 mg/L e 30,3 mg/L, respectivamente.

Foi determinado um valor médio de sólidos fixos de 6,7 mg/L, para o Lisímetro 02, e de 37,5 mg/L, para o Lisímetro 03.

Pode-se perceber uma diminuição na concentração de sólidos fixos no L03, possivelmente por conta da diluição do chorume pelo percolado, o que se justifica pelo início da ocorrência de precipitações pluviométricas, mesmo que escassas, a partir do mês de janeiro, assim como o seu preenchimento ser formado basicamente por compostos orgânicos

A fração de sólidos fixos se refere aos compostos de difícil degradação, entretanto, conforme visto na Figura 38, as concentrações obtidas representam uma soma bem abaixo da quantidade alcançada, tanto para os sólidos totais como para os sólidos voláteis, nos Lisímetros 02 e 03.

Percebe-se que os valores obtidos, em média, para os sólidos totais, assim como para a DQO tiveram uma concentração bastante expressiva confirmando, portanto, a caracterização da biodegradabilidade dos resíduos sólidos e indicando a relação intrínseca entre os dois parâmetros.

Pelos valores encontrados para a DQO e sólidos voláteis, nota-se a presença de grande quantidade da fração orgânica no lixiviado, assim como de altas concentrações de amônia, indicando a intensidade do processo de degradação, com a quebra de compostos mais complexos a substratos mais simples e prontamente utilizáveis pelos microorganismos decompositores.

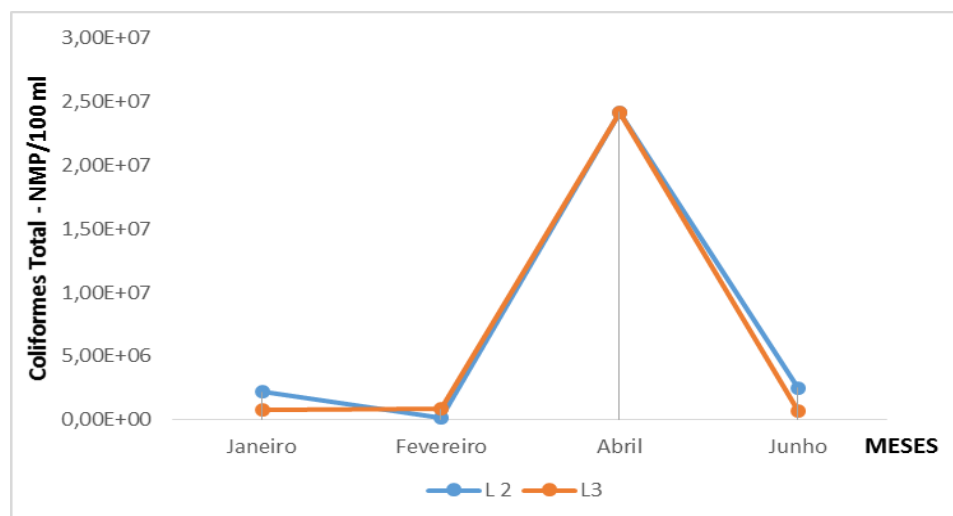
#### 4.1.10 Coliformes totais e *E.coli*

A análise microbiológica do lixiviado foi efetuada determinando-se a presença de coliformes totais e *E. coli*, por conta de os dois parâmetros serem bastante utilizados como indicadores de poluição ambiental.

Para Silva *et al.* (1997), a contagem de coliformes totais se reporta à concentração de microorganismos gram negativos presentes em uma amostra, ao passo que a caracterização de *E.coli*, se refere a microorganismos presentes em excretas humanas e de animais, sendo a sua presença um risco quanto à patogenicidade do lixiviado.

Na Figura 39 tem-se os valores de coliformes totais determinados nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03.

Figura 39 - Valores de Coliformes Totais nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).



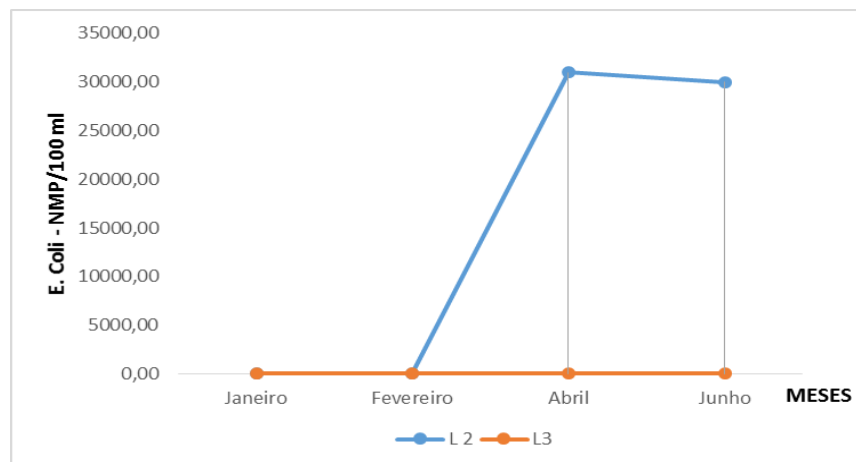
Em termos de coliformes totais, o valor máximo, para o Lisímetro 02, ocorreu em abril, igual a  $2,42 \times 10^7$  NMP/100 mL e o mínimo em fevereiro, com o valor de  $1 \times 10^5$  NMP/100 mL. Para os meses de janeiro e junho, os valores obtidos foram de  $2,19 \times 10^6$  NMP/100 mL e  $2,49 \times 10^6$  NMP/100 mL, respectivamente.

No Lisímetro 03, foi encontrado um valor máximo de coliformes totais também em abril sendo igual a  $2,42 \times 10^7$  NMP/100 mL, e o mínimo em junho, igual a  $6,44 \times 10^5$  NMP/100 mL. Para os meses de janeiro e fevereiro, os valores obtidos foram de  $7,54 \times 10^5$  NMP/100 mL e  $8,4 \times 10^5$  NMP/100 mL, respectivamente. Foi determinada uma média de  $7,24 \times 10^6$  mg/L coliformes totais, no lixiviado do Lisímetro 02, e de  $6,61 \times 10^6$  mg/L, no Lisímetro 03.

Percebe-se que as curvas são semelhantes entre o L02 e L03, indicando, da mesma forma que o acontecido para as frações de sólidos, indícios de maturidade na degradação dos resíduos, haja vista estes valores servem como um indicativo de os microrganismos estarem adaptados ao meio, e a possível variação que venha a ter ocorrido deve-se a intempéries como, por exemplo, uma forte precipitação e posteriormente a diluição do lixiviado.

Percebe-se que os valores obtidos para a média se encontram na ordem decimal de  $10^6$ , o que representa um valor acentuado para a quantidade de coliformes totais bem acima dos requisitos para o lançamento em recursos hídricos conforme, caso dos lixiviados fossem encaminhados diretamente para um manacial. Na Figura 40 apresentam-se os valores de *E. coli* determinados nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03.

Figura 40 - Valores de *E. coli* nos lixiviados dos Lisímetros 02 e 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Quanto à *E. coli*, os valores encontrados para o Lisímetro 02 referem-se aos meses de abril e junho sendo de  $3,1 \times 10^4$  NMP/100 mL e  $3 \times 10^4$  NMP/100 mL, respectivamente. Nos meses de janeiro e fevereiro houve ausência de *E. coli*. Já para o Lisímetro 03, em todos os meses ocorreu ausência de *E. coli*.

Mesmo com uma elevada concentração de microrganismos, caracterizada pelos teores de coliformes totais, a ausência verificada para *E.coli* no L03, conforme Silva (2013), pode ser considerada como normalidade, haja vista que nem sempre a presença de compostos orgânicos nos resíduos sólidos devem se encontrar estritamente relacionada a microrganismos presentes em dejetos humanos ou de animais.

Para alguns autores, como Eduardo (2007), a forte presença de microrganismo pode constituir um risco de impactos negativos e poluição para os recursos hídricos. Em contrapartida, a sua presença também pode servir como um indicativo de que os lisímetros podem constituir um satisfatório processo biológico para o tratamento do lixiviado.

## **4.2 Biogás**

Foi determinada a composição do biogás gerado em cada Lisímetro (L01, L02 e L03), tendo as medições sido realizadas na base e no meio de cada um. O período de avaliação foi de janeiro a junho de 2014.

De forma complementar aos dados obtidos para o meio e a base de cada lisímetro, foi efetuada também, uma leitura simplificada, ou seja, uma leitura direta, da composição dos gases no bocal de saída, acima da camada de cobertura da massa de resíduos, de forma a verificar uma possível influência entre as profundidades para a composição e a ascensão do biogás.

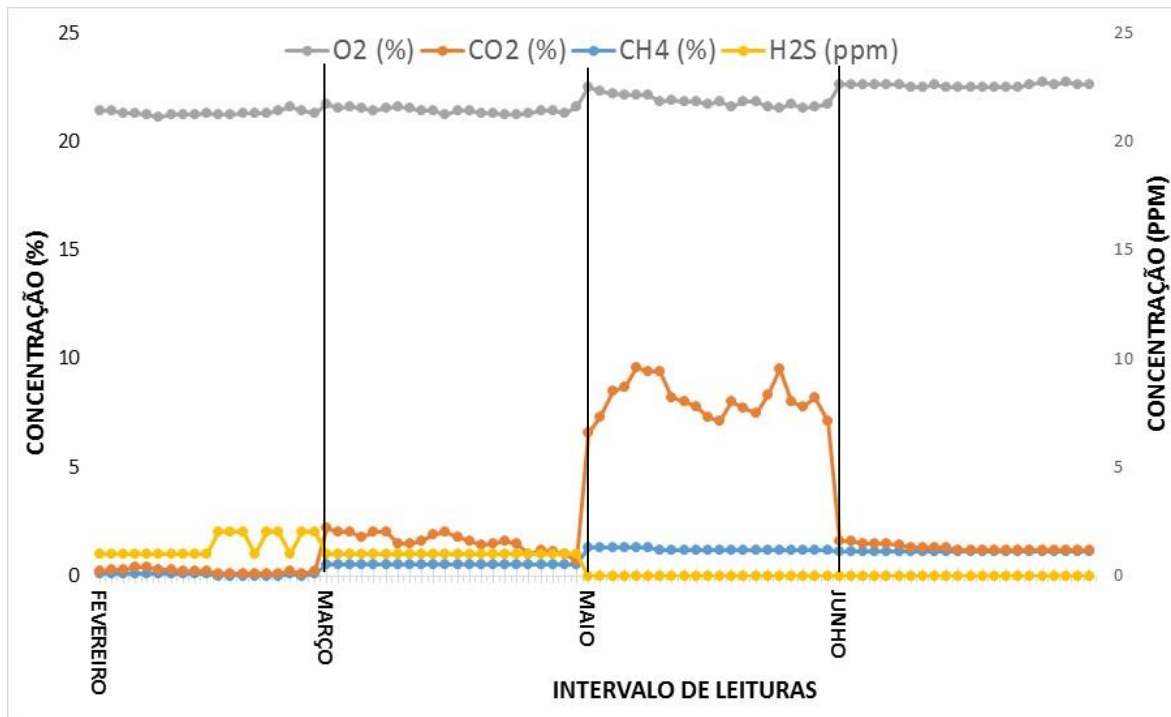
As leituras complementares foram realizadas nos meses de março, maio e junho de 2014.

Entre as medições efetuadas para a composição do biogás, foi dada maior ênfase para as concentrações de CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, por serem considerados gases importantes em um aterro sanitário, sendo destacado, principalmente, o percentual de metano, por conta da viabilidade de seu aproveitamento energético e na caracterização da etapa de degradação dos resíduos sólidos.

#### 4.2.1 Lisímetro 01: preenchido 100% com os resíduos na forma que chegam ao aterro sanitário

Nas Figuras 41 e 42 apresentam-se os valores obtidos para as concentrações dos gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>, na base e no meio do Lisímetro 01, respectivamente. Nas Tabelas 13 e 14 mostra-se, estatisticamente, a divisão dos valores obtidos nos gráficos acima para cada intervalo de tempo de leitura.

Figura 41 - Composição do biogás na base do Lisímetro 01 no ano de 2014.



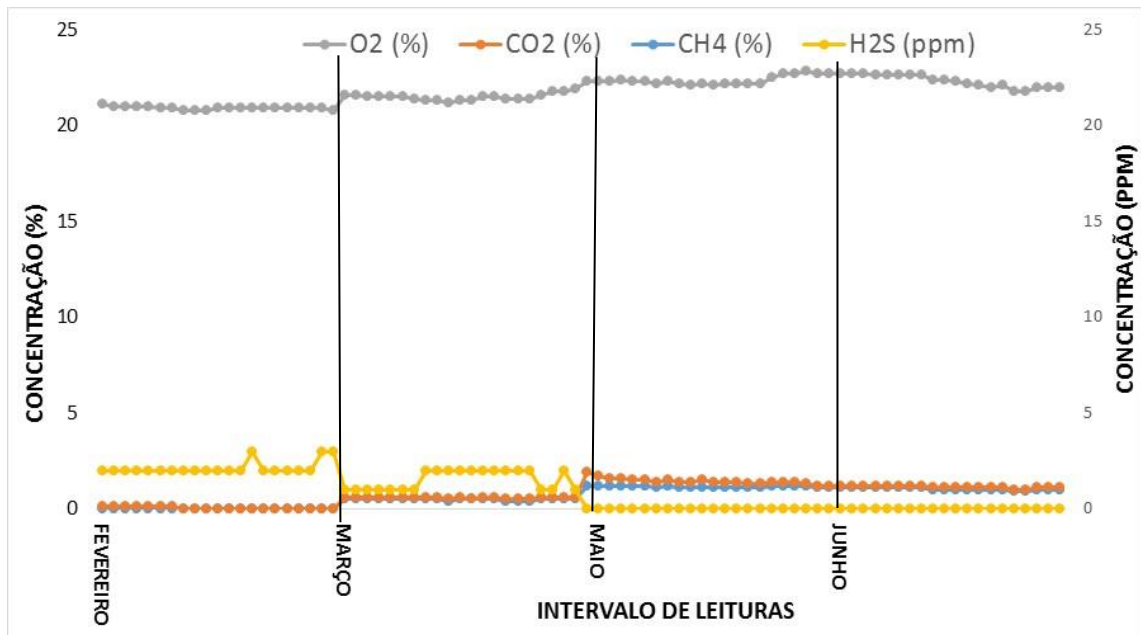
Fonte: Autor (2015).

Tabela 12 - Descrição dos valores da Figura 41 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
		VALOR MÉDIO	0,75	2,25	18,925
<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÁXIMO	1,3	8,3	21,2	1
	VALOR MÍNIMO	0,1	0,2	12,5	0
	DESVIO PADRÃO	1,3	2,818	2,992	0,513
	VALOR MÉDIO	0,709	2,121	18,874	0,581
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,3	8,2	21,3	2
	VALOR MÍNIMO	0	0,1	12,4	0
	DESVIO PADRÃO	0,472	2,866	3,133	0,626
	VALOR MÉDIO	0,721	1,800	19,243	0,643
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	8,3	21,5	2
	VALOR MÍNIMO	0	0,1	12	0
	DESVIO PADRÃO	0,471	2,981	3,381	0,745
	VALOR MÉDIO	0,756	1,567	19,544	0,667
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	7	21,5	2
	VALOR MÍNIMO	0	0,1	13,4	0
	DESVIO PADRÃO	0,485	2,785	3,178	0,866
	VALOR MÉDIO	0,726	2,041	19,016	0,581
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÁXIMO	1,3	8,3	21,5	2
	VALOR MÍNIMO	0	0,1	12	0
	DESVIO PADRÃO	0,469	2,823	3,099	0,641

Fonte: Autor (2015).

Figura 42 - Composição do biogás no meio do Lisímetro 01 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Tabela 13 - Descrição dos valores da Figura 42 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
		VALOR MÉDIO	0,53	0,10	21,12
<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	0,7	21,5	2
	VALOR MÍNIMO	0	0,1	20,4	0
	DESVIO PADRÃO	0,497	0,174	0,325	0,851
	VALOR MÉDIO	0,640	0,124	20,929	1,024
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	0,4	21,4	3
	VALOR MÍNIMO	0	0	20,7	0
	DESVIO PADRÃO	0,465	0,110	0,226	1,024
	VALOR MÉDIO	0,669	0,100	20,969	0,769
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	0,2	21,3	2,0
	VALOR MÍNIMO	0	0	21	0
	DESVIO PADRÃO	0,461	0,071	0,149	0,927
	VALOR MÉDIO	0,711	0,089	21,078	1,000
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,20	0,20	21,50	3,00
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	20,8	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,48	0,06	0,25	1,32
	VALOR MÉDIO	0,667	0,132	20,969	0,917
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÁXIMO	1,2	0,7	21,5	3,0
	VALOR MÍNIMO	0,67	0,13	20,97	0,92
	DESVIO PADRÃO	0,67	0,13	20,97	0,92

Fonte: Autor (2015).

Nos valores determinados para a base do L01 percebe-se que nos meses de fevereiro e março foi observado um aumento na concentração de gás sulfídrico, entretanto, tais concentrações, em partes por milhão, estão bem aquém do constatado nas bases dos Lisímetros L02 e L03 (Figuras 43 e 45).

Percebe-se, também, a mesma flutuação na concentração de H<sub>2</sub>S para o meio do lisímetro L01, ou seja, uma maior concentração nos primeiros meses, entretanto, com uma queda e estabilização nos dois meses finais.

Possivelmente, o aumento de gás entre os dois meses ocorreu devido ao início das chuvas, favorecendo uma maior umidade e o processo de decomposição pelas bactérias sulfetogênicas, entretanto, com a pouca quantidade de resíduos assimiláveis, a taxa metabólica dos microrganismos decaiu e, conseqüentemente, a formação de gás também.

Quanto ao metano, ocorreu o inverso do H<sub>2</sub>S, o que pode ter sido ocasionado por conta das bactérias sulfetogênicas se encontrarem mais adaptadas à mudança e prontas para a atividade de degradação dos resíduos, e dessa forma, assimilando mais prontamente os resíduos do que as bactérias metanogênicas, tendo-se assim, uma certa vantagem competitiva.

Para o gás sulfídrico, a concentração média, para a base e meio do L01, foi de 0,58 ppm e de 0,92 ppm, respectivamente. Quanto ao metano, a média encontrada foi de 0,73 % e de 0,67 %, respectivamente, para a base e meio. Para o dióxido de carbono, foram obtidos 2% e 0,13%, ao passo que para oxigênio foram encontrados 19% e 21%, respectivamente.

Nos meses em que as concentrações de gás sulfídrico foram maiores, ou seja, antes da redução e estabilização, as médias das concentrações na base e no meio foram de 1,16 ppm e de 1,83 ppm, respectivamente, ou seja, praticamente o dobro da média para o período total.

Percebe-se que, em termos de percentual de metano, não foi verificada uma brusca variação quanto à média para cada tempo de leitura, ficando para cada tempo algo em torno de 0,7%. O valor máximo da concentração de metano foi de 1,3%, assim como em 1,3 foi o maior valor encontrado de desvio padrão.

Os valores indicados como maiores reportam-se às primeiras leituras, ou seja, as que apresentavam um intervalo de 1 minuto entre elas, como se estivesse acumulado um bolsão de biogás dentro do lisímetro, cuja concentração tende a decair pela purga do equipamento.

Da mesma forma que na Tabela 12 percebe-se na Tabela 13 que, em termos de metano, os valores máximos para cada intervalo de tempo ficaram bem próximos, ou seja de 1,2%, não sendo perceptível, a influência da profundidade da massa de resíduos para o mecanismo de biodegradação.

O desvio padrão também foi maior no tempo de 1 minuto e foi decaindo com as outras purgas, entretanto, a diferença entre os desvios padrões foi bem menor, comprovando-se o melhor equilíbrio da concentração de gás com o tempo de sucção pelo equipamento, possivelmente porque, quando da purga, algum bolsão na base do lisímetro tendia a ascender para o meio de forma constante.

A semelhança entre os valores da base e do meio do L01, diferentemente do encontrado para o L02 e L03 (Figuras 43, 44, 45 e 46), possivelmente está relacionada à pouca produção de lixiviado no lisímetro.

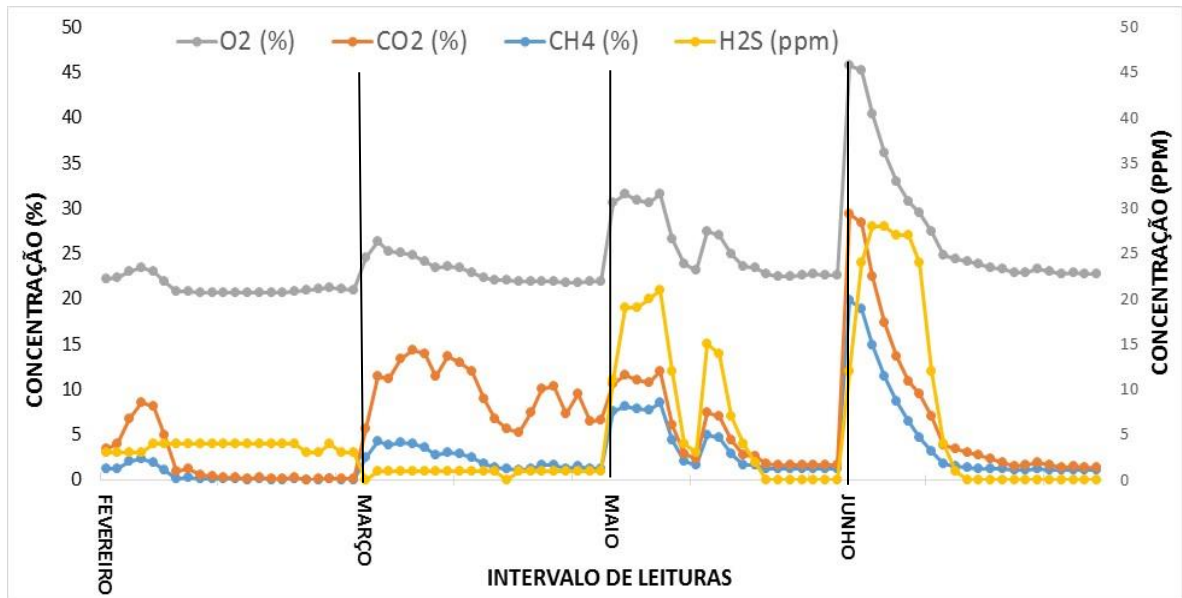
Comparado com os dois últimos lisímetros, as concentrações de metano, dióxido de carbono e de gás sulfídrico no L01 foram bem menos expressivas, ou seja, a atividade metabólica dos microrganismos foi menos intensa, possivelmente por conta do preenchimento do lisímetro e a sua menor concentração de material orgânicos quando comparado ao L02 e L03.

Nota-se que, o aumento de  $\text{CO}_2$ , ocorre de forma conjunta ao de  $\text{CH}_4$  demonstrando que estão inter-relacionados quando do processo de degradação da massa de resíduos, e ainda mais se influenciados pelo aumento da umidade, como o visto pelo acréscimo de chuvas no mês de maio.

#### 4.2.2 Lisímetro 02: preenchido 50 % com os resíduos na forma que chegam ao aterro sanitário e 50% com material orgânico

Nas Figuras 43 e 44 apresentam-se os valores das concentrações dos gases  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{O}_2$ , na base e no meio do Lisímetro 02, respectivamente. Nas Tabelas 15 e 16, percebe-se, estatisticamente, a divisão dos valores obtidos no L02 para cada intervalo de tempo de leitura.

Figura 43 - Composição do biogás na base do Lisímetro 02 no ano de 2014.



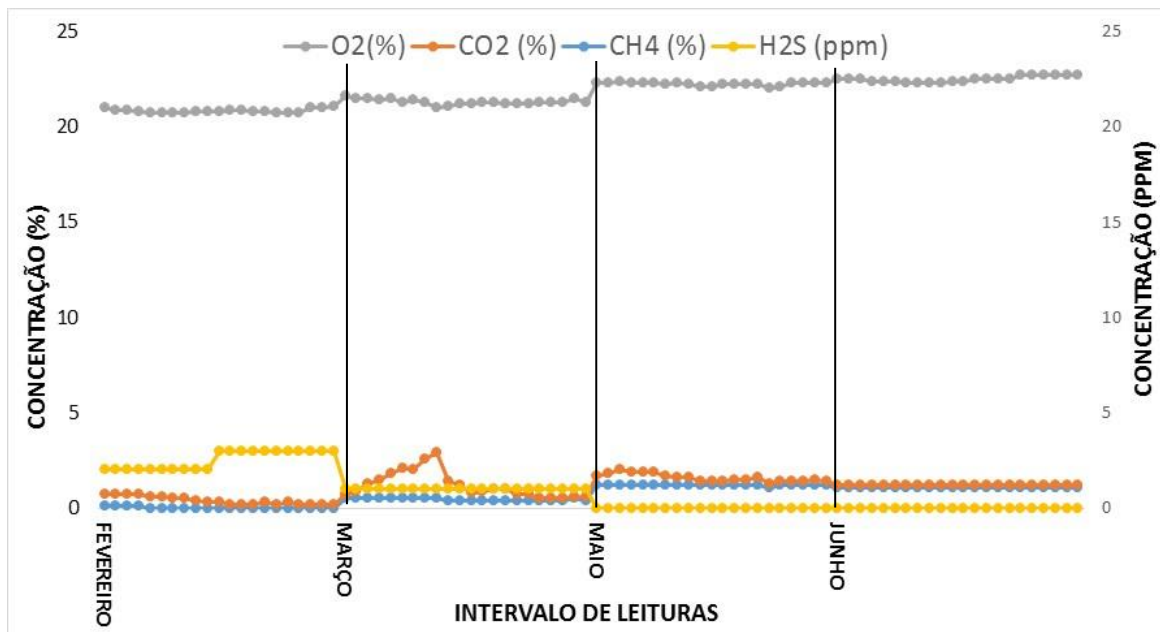
Fonte: Autor (2015).

Tabela 14 - Descrição dos valores da Figura 43 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
		VALOR MÉDIO	7,07	5,65	17,08
<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÁXIMO	19,80	10,30	20,00	28,00
	VALOR MÍNIMO	1,20	2,20	10,50	0,00
	DESVIO PADRÃO	5,56	2,64	2,83	10,60
	VALOR MÉDIO	1,812	2,893	18,644	4,439
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	6,5	10,5	21,4	27,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	10,0	0,0
	DESVIO PADRÃO	1,58	3,18	3,54	6,13
	VALOR MÉDIO	1,00	2,18	18,94	1,08
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,7	8,6	21,4	4,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	11,6	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,6	3,4	3,9	1,4
	VALOR MÉDIO	0,91	1,75	19,45	1,08
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	1,5	8,0	21,4	4,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	12,3	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,54	2,78	3,18	1,44
	VALOR MÉDIO	2,81	3,28	18,43	5,14
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÁXIMO	19,8	10,5	21,4	28,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	10,0	0,0
	DESVIO PADRÃO	3,75	3,29	3,42	7,63

Fonte: Autor (2015).

Figura 44 - Composição do biogás no meio do Lisímetro 02 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).



Tabela 15 - Descrição dos valores da Figura 44 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
		<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÉDIO	0,74	0,50
	VALOR MÁXIMO	1,2	1,3	21,3	2,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	19,7	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,46	0,34	0,51	0,85
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	0,662	0,481	20,467	0,929
	VALOR MÁXIMO	1,2	2,4	21,3	3,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	18,1	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,50	0,52	0,66	1,09
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	0,708	0,169	20,931	0,923
	VALOR MÁXIMO	1,20	0,30	21,50	3,00
	VALOR MÍNIMO	0,00	0,10	20,40	0,00
	DESVIO PADRÃO	0,511	0,075	0,395	1,256
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	0,70	0,16	21,03	0,90
	VALOR MÁXIMO	1,2	0,3	21,5	3,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	20,7	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,49	0,07	0,33	1,20
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÉDIO	0,69	0,40	20,63	0,87
	VALOR MÁXIMO	1,2	2,4	21,5	3,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	18,1	0,0
	DESVIO PADRÃO	0,5	0,4	0,6	1,1

Fonte: Autor (2015).

Para os valores observados na base do L02, percebe-se que, nos meses de maio e junho foi encontrado um elevado aumento na concentração de gás sulfídrico e de metano, os quais podem ter sido influenciados por precipitações mais intensas dentre esses meses, ou seja, facilitando a produção do lixiviado e tornando a fração dos resíduos mais degradável pelos microrganismos.

Como pode ser visto na Figura 43 e na Tabela 14, principalmente, nos meses de maio e junho, cada gás teve um pico inicial, seguido de queda e estabilização nos valores, foi visto também que a representatividade das concentrações estava relacionada com a forte vazão de lixiviado durante o momento de leitura. Para esses meses foi constatada grande produção de lixiviado, com alta vazão na purga da composição do gás, principalmente no tempo de 1 minuto.

A grande produção de lixiviado na base do L02 foi um indicativo da influência da precipitação no processo de degradação da matéria orgânica e produção de gases. Nas leituras iniciais foram verificadas as maiores concentrações que tenderam a se tornarem constantes.

Pela Tabela 14 percebe-se os maiores valores de desvio padrão nas leituras iniciais, ou seja, nos tempos de 1 e 5 minutos, justamente por conta do acúmulo de gases dentro dos lisímetros e a forte produção de líquidos. Quando a purga de gás pelo equipamento foi continuando para os tempos de 10 e 15 minutos, a produção tanto de gás quanto de efluente decaíram e tenderam ao equilíbrio.

Pela Tabela 14 observa-se que foi encontrado o valor máximo de 19,8% para metano, no Lisímetro 02, o que é um valor significativo. Este percentual, se comparado ao alcançado para o L01, ou seja, 1,3%, se deve ao fato do preenchimento apresentar diferença entre ambos, tendo ocorrido uma maior atividade metabólica dos microrganismos na degradação de compostos e produção de gás no lisímetro L02, preenchido com matéria orgânica, enquanto que no L01 se tem uma maior quantidade de resíduos inorgânicos e de extensas cadeias poliméricas.

De acordo com a Figura 44, observa-se que os gases tiveram um comportamento constante ao longo das análises, sendo uma variação maior nas leituras de fevereiro, constatando-se um pico de ascensão para o gás sulfídrico e de certa forma, um comportamento semelhante ao observado para o L01. Possivelmente a ausência de chuvas no período e a presença de fissuras na camada de cobertura tenham propiciado dos menores valores para  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ .

O preenchimento do L02 com os resíduos sólidos foi efetuado de forma que do meio para o topo do lisímetro fossem colocados resíduos orgânicos. Após um tempo de permanência de aproximadamente dois anos, o que ocorreu foi que a camada com matéria orgânica se transformou em lixiviado, descendo para a base, resultando em um grande recalque de aproximadamente 1,3 metros.

Para o gás sulfídrico, a concentração média (quando se comparado todos os meses), para a base e meio do L02, foi de 5,14 ppm e de 0,87 ppm, respectivamente. Quanto ao metano, a média encontrada foi de 2,81 % e de 0,69 %, respectivamente, para a base e o meio do lisímetro. Para o dióxido de carbono, foram determinados 3,28 % e 0,40 %, enquanto que para o oxigênio foram determinadas médias, de 18,43 % e 20,63 %.

Com base nos valores alcançados para as médias, pode ser verificada a grande diferença de valores entre o meio e a base do lisímetro L02, influenciado diretamente pelo lixiviado produzido e acumulado na base. Na Tabela 15 observa-se pouca variação entre os desvios padrões dos intervalos de leitura para cada gás no meio do lisímetro.

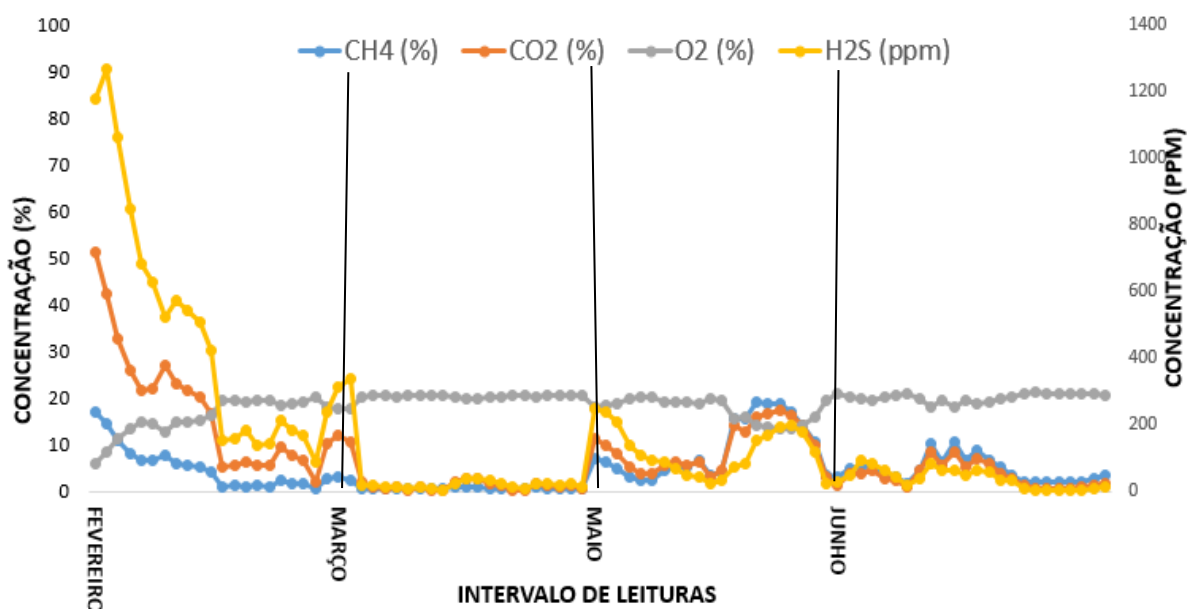
De acordo com a Tabela 15, foram verificados valores mínimos na faixa de 0 a 0,1 (% ou ppm) para o CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>S, constatando-se a influência da profundidade para a produção de gás, como descrito acima, possivelmente devido ao escape pelas fissuras da camada de cobertura do lisímetro, justamente, por causa da estiagem e a alta taxa de evaporação.

#### 4.2.3 Lisímetro 03: preenchido 100% com os resíduos de material orgânico

Nas Figuras 45 e 46 são apresentados os valores obtidos para as concentrações dos gases CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e O<sub>2</sub>, na base e no meio do Lisímetro 03. Nas Tabelas 17 e 18, percebe-se, estatisticamente, a divisão dos valores obtidos no L03 para cada intervalo de leitura.

De acordo com a Figura 45, foram constatados elevados valores nas concentrações de metano, dióxido de carbono e gás sulfídrico, este último principalmente. Grande parte do ocorrido se justifica pela própria composição do Lisímetro (100% resíduos orgânicos) e pela forte produção de lixiviado.

Figura 45 - Composição do biogás na base do Lisímetro 03 no ano de 2014.



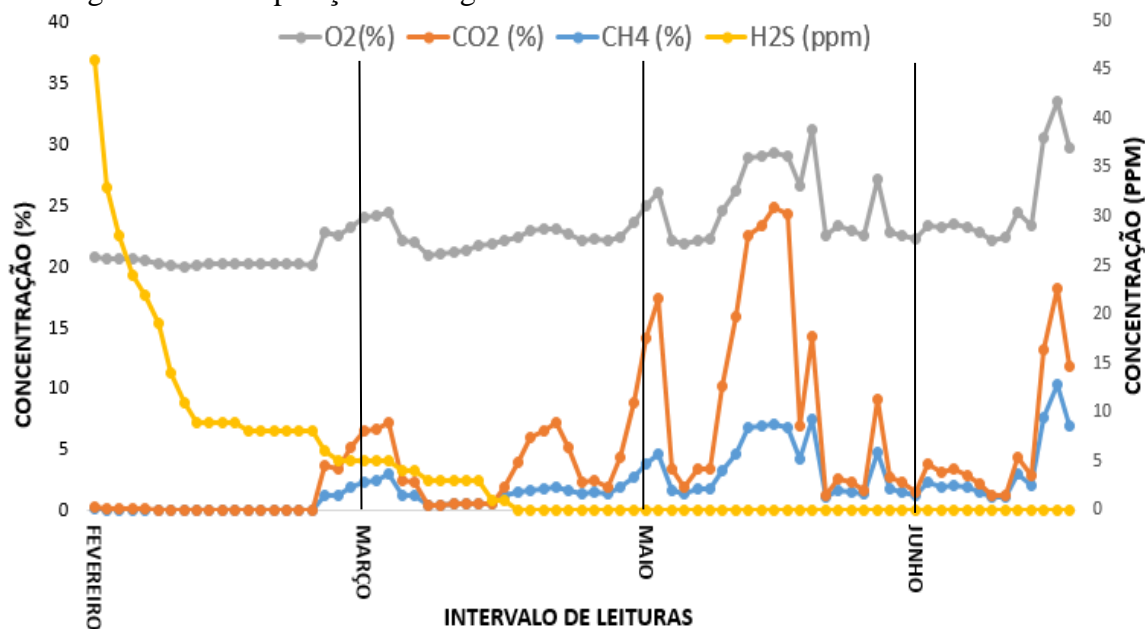
Fonte: Autor (2015).

Tabela 16 - Descrição dos valores da Figura 45 para a base do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
		VALOR MÉDIO	5,36	11,68	17,69
<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÁXIMO	17,1	51,5	20,9	1267,0
	VALOR MÍNIMO	0,5	0,3	5,9	9,0
	DESVIO PADRÃO	4,58	15,10	4,44	429,38
	VALOR MÉDIO	5,38	7,75	18,50	131,85
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	19,3	26,9	21,0	629,0
	VALOR MÍNIMO	0,5	0,1	12,8	6,0
	DESVIO PADRÃO	5,0	7,4	2,3	180,3
	VALOR MÉDIO	4,32	5,89	18,97	101,71
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	18,7	17,4	21,2	216,0
	VALOR MÍNIMO	0,7	0,7	13,5	3,0
	DESVIO PADRÃO	6,0	5,6	2,6	85,6
	VALOR MÉDIO	2,88	4,53	19,55	99,83
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÁXIMO	10,5	11,9	21,1	339,0
	VALOR MÍNIMO	0,5	0,5	16,0	3,0
	DESVIO PADRÃO	2,6	4,6	1,7	126,1
	VALOR MÉDIO	4,8	7,8	18,6	164,2
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÁXIMO	19	52	21	1267
	VALOR MÍNIMO	0,5	0,1	5,9	3,0
	DESVIO PADRÃO	4,9	9,4	2,9	255,2

Fonte: Autor (2015).

Figura 46 - Composição do biogás no meio do Lisímetro 03 no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Tabela 17 - Descrição dos valores da Figura 46 para o meio do Lisímetro em cada tempo de leitura.

		CH4 (%)	CO2 (%)	O2 (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)
<b>1 MINUTO</b>	VALOR MÉDIO	1,62	2,29	19,02	9,00
	VALOR MÁXIMO	7,4	6,8	21,2	46,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,1	15,8	0,0
	DESVIO PADRÃO	1,7	2,1	1,7	13,7
<b>5 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	1,40	1,72	19,04	3,24
	VALOR MÁXIMO	4,7	12,8	20,8	19,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	8,6	0,0
	DESVIO PADRÃO	1,24	2,90	2,68	4,91
<b>10 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	1,10	0,98	19,80	2,58
	VALOR MÁXIMO	3,2	6,9	21,2	8,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	14,4	0,0
	DESVIO PADRÃO	1,09	1,99	1,88	3,45
<b>15 MINUTOS</b>	VALOR MÉDIO	5,30	8,89	12,97	1,45
	VALOR MÁXIMO	10,2	17,7	20,5	8,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	4,5	0,0
	DESVIO PADRÃO	3,29	7,15	6,70	3,24
<b>LEITURA COMPLETA</b>	VALOR MÉDIO	1,966	2,778	18,283	4,377
	VALOR MÁXIMO	10,2	17,7	21,2	46,0
	VALOR MÍNIMO	0,0	0,0	4,5	0,0
	DESVIO PADRÃO	2,21	4,31	3,88	8,27

Fonte: Autor (2015).

Em termos de oxigênio, percebe-se concentrações próximas da faixa de 20 a 21%, justamente o que seria o encontrado no ambiente natural, tendo ocorrido apenas um decaimento somente nas leituras finais, de maio, onde se teve um acréscimo de metano e dióxido de carbono, indicando o uso de O<sub>2</sub> pelas bactérias aeróbias para degradação orgânica e geração de outros compostos.

Observa-se que os valores máximos de metano no lisímetro L02 ficaram bem próximos dos encontrados no L03, ressaltando-se, desta forma, a grande contribuição do teor orgânico para a produção de biogás.

Nota-se a diferença principalmente quanto ao gás sulfídrico; os valores determinados para L03 foram bem mais expressivos, possivelmente por conta das bactérias sulfetogênicas já estarem bem adaptadas aos resíduos. Por conta dos altos valores, pode ter acontecido uma competição por compostos entre as bactérias metanogênicas e sulfetogênicas, fato que, se não tivesse ocorrido uma grande e excessiva produção de H<sub>2</sub>S, os compostos orgânicos poderiam ter sido convertidos ainda mais em gás metano.

Nas leituras na base do lisímetro L03, no mês de maio, foi verificada uma coloração bem mais escura no lixiviado que nos outros meses, possivelmente por conta da maior presença de compostos húmicos no efluente.

Da mesma forma ao ocorrido para a base no lisímetro L03, observa-se que as concentrações de CH<sub>4</sub> e de CO<sub>2</sub> no meio do lisímetro aumentaram no mês de maio, entretanto o H<sub>2</sub>S permaneceu com valores baixos e constantes, indicando que a incidência deste gás está relacionada com o lixiviado formado, haja vista que no *cap* onde se realizaram as leituras no meio do lisímetro não se verificou qualquer presença de líquidos.

Para o gás sulfídrico, as concentrações médias, para a base e meio do lisímetro L03, foram de 164,22 ppm e de 4,38 ppm, respectivamente. Quanto ao metano, as médias encontradas foram de 4,83 % e de 1,97 %, para a base e meio. Para o dióxido de carbono, foram obtidos 7,84 % e 2,78 %, enquanto que para o oxigênio, foram determinados valores de 18,55 % e 18,28 %, respectivamente.

No mês de maio não foram possíveis as leituras com o intervalo de 15 minutos no meio do lisímetro L03, devido a condições operacionais adversas. Assim, os valores apresentados para o tempo de 15 minutos, na Tabela 17 são referentes às informações colhidas somente para outros meses de leitura da pesquisa.

Mesmo com os altos valores para os gases no L03, tanto no meio como na base, foi possível verificar, como demonstrado na Tabela 17, que, junto aos mínimos dos intervalos de leituras foi encontrado a ausência de metano e dióxido de carbono, principalmente no mês de fevereiro, quando da menor incidência de precipitações pluviométricas.

Para o intervalo total de leituras, ou seja, em todos os meses, foram constatadas, para a base do L03, a temperatura mínima de 26,8 ° C e a máxima de 30,9 °C. Já para o meio do lisímetro, foram determinados o valor mínimo de 26,7 °C e o máximo de 37,7 °C, o. Salienta-se também que para os demais Lisímetros os valores de temperatura se encontraram em faixas propícias à atividade das bactérias mesófilas.

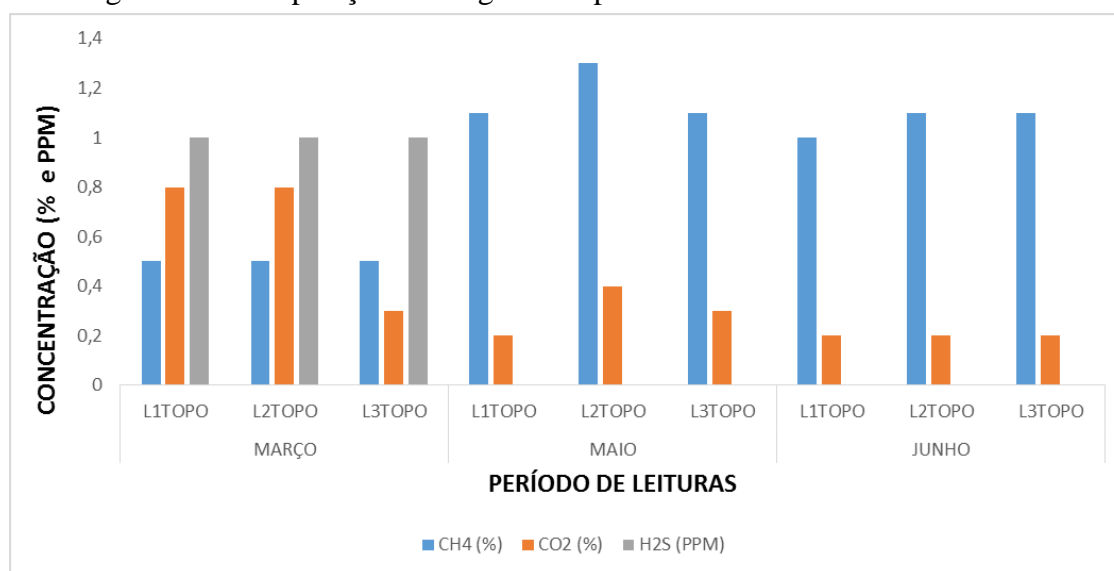
#### 4.2.4 Leitura no topo dos lisímetros: avaliação direta da composição do biogás

As leituras no topo dos três lisímetros foram realizadas como complemento aos dados determinados na base e no meio. Devido aos elevados valores de recalque, não existiam mais resíduos no topo dos lisímetros e dessa forma, inviável a quantificação quanto à geração de biogás.

A avaliação no topo do lisímetro também pode ter sofrido certas interferências e limitações, haja vista terem sido encontradas algumas aberturas na tubulação central, propiciando escape de gás. Mesmo assim, foi constatada a presença de compostos, principalmente o metano, que tem potencial para fins energéticos.

De acordo com a Figura 47, foi constatada, para maio e junho, uma média de 1,1% de metano em cada lisímetro, próximo ao valor das últimas leituras na base dos mesmos, para os tempos de 15 minutos. Salienta-se que o valor é bem aquém das leituras iniciais no intervalo de 1 minuto para a base, confirmando a existência de bolsões de gás dentro dos lisímetros e não o fato da constância na biodegradação e na produtividade pelas atividades metabólicas dos microorganismos.

Figura 47 - Composição do biogás no topo dos lisímetros no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Comparando com os valores determinados para o meio dos lisímetros, o encontrado para o topo é bem mais representativo no L01 e L02, haja vista que o valor encontrado de 1,1 % fica próximo dos valores constantes nas Figuras 42 e 44. Quanto ao lisímetro L03, não houve uma constância entre os dados para metano e dióxido de carbono, no meio ou na base.

A possível relação entre o meio e o topo nos lisímetros L01 e L02 talvez esteja relacionada com o modo de preenchimento dos lisímetros, haja vista que, ao se colocar resíduos na forma como chegam ao aterro e com menos fração orgânica do que no L03, a produção de lixiviado foi menor. Além disso, a cobertura da massa de resíduos, envolvendo o coletor central, encontra-se mais compactada, dificultando a perda dos gases.

Pela Figura 47 verifica-se que os índices de gás sulfídrico foram muito baixos no L01, ou seja, apenas 1 ppm de média no mês março e a ausência nos outros meses. O mesmo foi observado com o L02 e L03, onde houve produção de lixiviado. Nestes, a representatividade no topo foi fraca em relação aos valores percentuais obtidos para a base, evidenciando a tendência desse gás em permanecer próximo ao lixiviado.

### **4.3 Caracterização da massa de resíduos**

A caracterização da massa de resíduos ocorreu por meio das análises de sólidos (totais, fixos e voláteis), séries nitrogenadas (amônia, nitrito e nitrato) e o teor de umidade, os quais serviram para auxiliar no entendimento de como se encontra a massa de resíduos ao longo do processo de degradação pelos microrganismos. Na Tabela 18 encontram-se os valores determinados para cada parâmetro e em cada lisímetro.

Vale ressaltar que no L03, para alguns parâmetros em particular, como por exemplo a série de compostos nitrogenados (Amônia, Nitrito e Nitrato) houve um forte variação entre os valores alcançados em março e junho de 2014 ocorre se deve a coleta naquele primeiro mês ter ocorrido na base tendo-se a biomassa de resíduos apresentado uma característica bem pastosa, assim como uma forte incidência de lixiviado, diferentemente ao encontrado para o topo do lisímetro.



Tabela 18 – Características da massa de resíduos dos lisímetros no ano de 2014.

Parâmetros	Março	Junho		
	L03	L01	L02	L03
Sólidos Totais (mg/L)	200	151,2	102,1	200,0
Sólidos Fixos (mg/L)	5,2	137,6	51,8	97,7
Sólidos Voláteis (mg/L)	194,8	13,6	50,3	102,3
Umidade (%)	8,36%	2,88%	6,39%	3,55%
Amônia (mg/L)	26,3	19,04	20,7	8,1
Nitrito (mg/L)	0,09	0,04	0,04	0,005
Nitrato (mg/L)	118,64	5,15	3,95	4,69

L01 – lisímetro 01; L02 – lisímetro 02; L03- lisímetro 03.

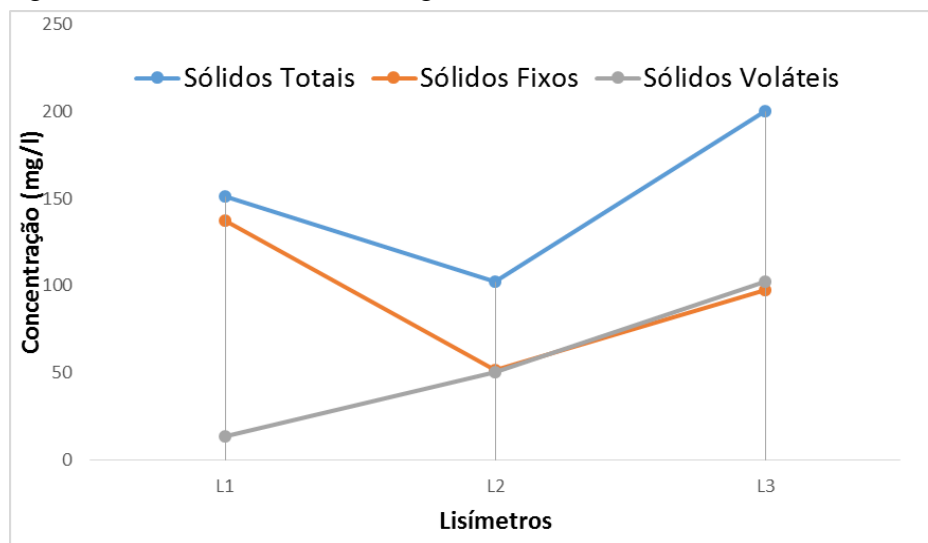
Fonte: Autor (2015).

### 4.3.1 Frações de sólidos

O teor de cada fração de sólidos é importante por servir como um comparativo do processo de degradação, estando relacionado com o processo de produção dos gases e de efluentes.

Na Figura 48, apresentam-se dados sobre os teores de sólidos totais, fixos e voláteis na massa de resíduos no mês de junho.

Figura 48 - Teores de sólidos (mg/L) na massa de resíduos em Junho de 2014.



Fonte: Autor (2015).

Foi realizada a coleta inicial na base dos lisímetros, por ser o local de maior produção de gases. Todavia, em março só foi possível a coleta referente ao L03, estando a biomassa com a aparência bem pastosa, indicando já ter sofrido um forte processo de degradação.

Na Tabela 18, percebe-se para o L01 a proximidade entre os valores de sólidos fixos e totais e a baixa presença de sólidos voláteis, indicando desta forma, a fraca presença de materiais orgânicos e biomassa, o que justifica os menores valores alcançados para CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, e a fraca produção de lixiviado, quando comparado com o L02 e L03.

De forma inversa ao ocorrido no L01 observa-se no L03 uma maior presença dos compostos voláteis, que se justifica devido à forma de preenchimento do mesmo com resíduos orgânicos.

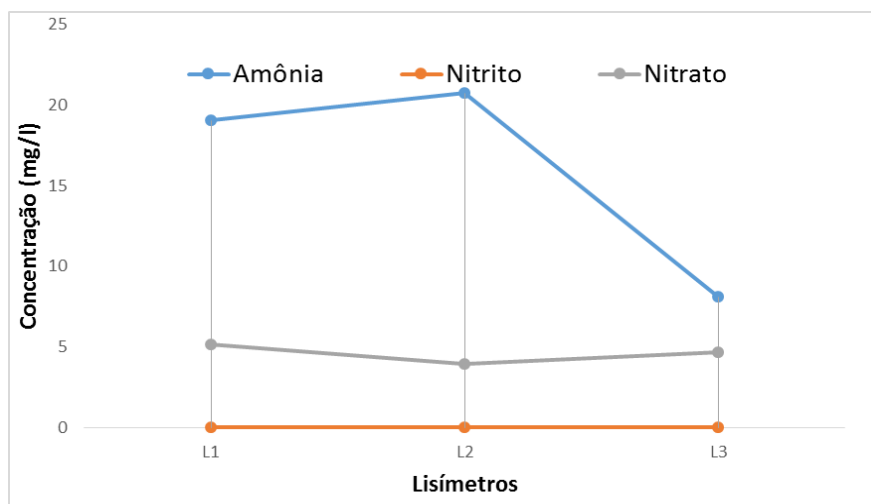
Conforme Alcântara (2007), o teor de sólidos voláteis em lisímetros existentes no Aterro da Muribeca, em Pernambuco, na fase inicial, foi estimado em cerca de 70%, enquanto que os resíduos submetidos após um ano de degradação alcançaram aproximadamente 35% em representatividade ao total, indicando uma fase intermediária de degradação.

Quanto aos valores determinados nos três lisímetros, o percentual de sólidos voláteis foi de 9% para o lisímetro L01, 49% para o L02 e de 51,1% para o L03, o que pode indicar, para estes dois últimos, característica de um resíduo novo, ou seja, com forte presença de teor orgânico e em atividade de degradação, por isso a grande geração de lixiviado em sua base, ao contrário do verificado no L01 com forte teor inorgânico.

#### **4.3.2 Compostos nitrogenados**

A Figura 49 demonstra o comportamento dos teores de compostos nitrogenados na massa de resíduos dos três lisímetros para o mês de junho. De acordo com a figura, nota-se que a amônia alcançou maiores concentrações que as demais frações, indicando que parte dos resíduos existentes ainda apresenta atividades iniciais de degradação.

Figura 49 - Compostos nitrogenados na massa de resíduos dos três lisímetros, em junho de 2014.



Fonte: Autor (2015).

As variações nas concentrações entre amônia e nitrato podem auxiliar na identificação da idade do processo de degradação da massa de resíduos. Conforme Melo (2003), a geração da fração de amônia está relacionada com o processo de degradação do material orgânico, ou seja, as proteínas existentes nos resíduos são diretamente convertidas em amônia pela ação dos microrganismos ali presentes.

Para o lisímetro L03, observa-se um decaimento do teor de amônia, quando se compara com os valores obtidos para os lisímetros L02 e L01.

O valor de amônia na massa de resíduos determinado em março, na base do L03, foi superior ao encontrado para o topo do lisímetro em junho, indicando que o potencial de degradação encontra-se ativo e com grande degradação da fração orgânica na base quando se comparado ao topo dos lisímetros.

Conforme a Figura 49, houve praticamente uma constante entre os valores obtidos para os três lisímetros quanto a nitrito e nitrato, demonstrando, de certa forma, uma estabilização do processo de degradação dos resíduos sólidos, devendo a grande produção de gases se dever à correlação com a amônia.

### 4.3.3 Teor de umidade

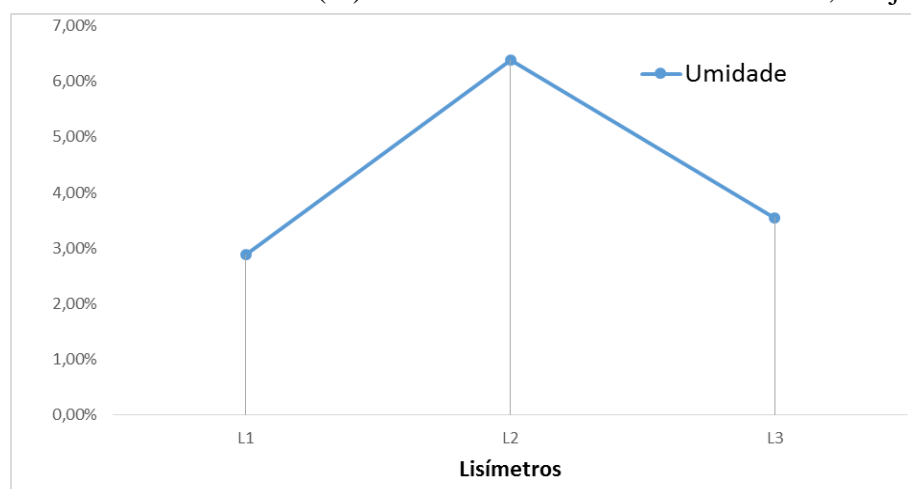
A análise do teor de umidade é importante pelo fato de ser essencial à vida dos microrganismos responsáveis pela decomposição da matéria orgânica. O parâmetro umidade está relacionado com o peso da água sobre o peso dos sólidos contidos em um determinado volume de material.

Quanto mais representativo for o teor de umidade dentro da massa de resíduos sólidos mais incipiente será o processo de degradação anaeróbia, assim como, a formação de gases metano e sulfídrico.

Conforme Barlaz (1996), para se ter um bom índice de degradação da matéria orgânica faz-se necessário um teor de umidade entre 20% e 40%, haja vista que, se o valor encontrado estiver acima desta faixa, podem ocorrer limitações nas reações biológicas de decomposição; se o valor de umidade estiver abaixo, o processo é inibido.

De acordo com a Figura 50, os valores obtidos para o teor de umidade em junho no L01, L02 e L03, foram de 2,9%, 6,4% e de 3,5%, respectivamente, bem abaixo do indicado como ideal por Barlaz (1996), entretanto, não tão distantes do verificado por Silva (2013), sete meses após a implantação dos lisímetros, que foram de 10,6%, para o L02, e de 15,3% para o L03, em novembro de 2012.

Figura 50 - Teores de umidade (%) na massa de resíduos nos lisímetros, em junho de 2014.



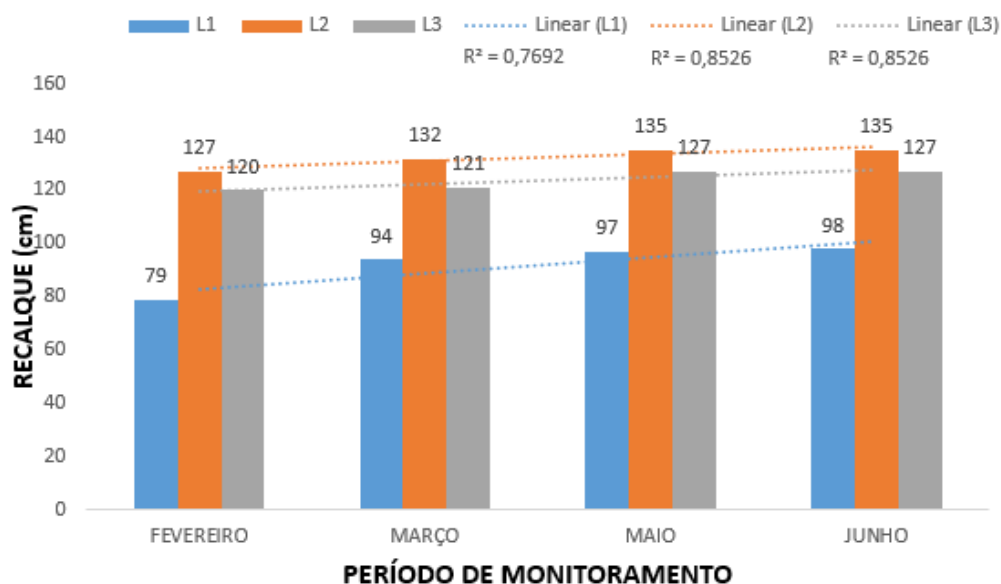
Fonte: Autor (2015).

#### 4.4 Recalque da massa de resíduos

A avaliação do recalque da massa de resíduos foi complementar às demais determinações. Por meio dessa ferramenta é possível observar se os resíduos sólidos estão sofrendo ativamente processos de degradação dentro dos lisímetros.

Os dados sobre recalque da massa de resíduos nos lisímetros estão indicados na Figura 51.

Figura 51 - Recalque da massa de resíduos no período de monitoramento dos lisímetros no ano de 2014.



Fonte: Autor (2015).

De acordo com a Figura 51 nota-se que o L01 foi o que apresentou o menor recalque, ou seja, 79 cm quando do início da coleta dos dados desta pesquisa e de 98 cm ao término dos trabalhos. Para o lisímetro L02, constatou-se um recalque de 127cm no mês de fevereiro, e de 135 cm em junho no término das medições. O recalque dos resíduos no L03 alcançou 120 cm, inicialmente, e 127 cm no final.

Os lisímetros 02 e 03 apresentaram valores de recalque bem maiores que o L01, o que se justifica pela maior presença de materiais orgânicos durante o seu preenchimento, o que resultou em processo mais acentuado de degradação e produção de lixiviado, diminuindo, desta forma, a quantidade inicial de biomassa.

Percebe-se, para os lisímetros 02 e 03, que o coeficiente de linearidade indicado na Figura 51 é o mesmo, ou seja, 0,8526, indicando similaridade quanto ao avanço do processo de degradação.

Para o L01, o valor encontrado de 19 cm de diferença ocorreu, possivelmente, por conta dos espaços vazios formados dentro do lisímetro, e durante o período de análises o percolado pode ter facilitado o deslocamento de alguma massa de resíduos, possibilitando um certo rebaixamento.

Para este lisímetro em particular, por conta do seu preenchimento, a degradação pelos microrganismos foi menos acentuada, como visto quanto aos valores de produção de biogás, e desta forma, o rebaixamento pode ser descrito como resultante de uma acomodação da massa de resíduos e não um indicativo de forte biodegradação.

Nas medições de recalque foram verificados locais mais rebaixados que os demais, como indicado na Figura 52, demonstrando que os resíduos não seguem uma uniformidade de rebaixamento vertical dentro dos lisímetros.

Figura 52 - Indicação de um local de maior rebaixamento da massa de resíduos.



Fonte: Autor (2015).

## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Os procedimentos adotados para a avaliação do funcionamento dos lisímetros demonstram que os resíduos sólidos sofreram um forte processo de degradação, juntamente com a intensa produção de lixiviado, principalmente, no L02 (metade preenchida com resíduos orgânicos) e L03 (totalmente preenchido com resíduos orgânicos).

Foi possível verificar que a precipitação pluviométrica ocorrida na área do experimento interferiu no processo de degradação da massa de resíduos, haja vista que nos meses em que ocorreram as maiores precipitações foi quando se observou elevações nas concentrações de  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  e  $\text{CO}_2$ , principalmente nas bases dos lisímetros, onde havia a forte acumulação do lixiviado.

Os maiores valores de recalque da massa de resíduos sólidos foram determinados no final do experimento, nos lisímetros L02 e L03, com 135 cm e 127 cm respectivamente, indicando uma alta intensidade de degradação dos resíduos orgânicos. Como esta pesquisa foi realizada após dois anos de enchimento dos lisímetros, constatou-se que, para o L02 e L03 a maior influência no recalque se deve diretamente ao processo de formação do lixiviado.

Com base nos resultados da pesquisa observa-se que houve forte processo de degradação da massa de resíduos, em particular no L03, demonstrando a forte atividade dos microrganismos na digestão dos resíduos através da caracterização pastosa da biomassa na base, assim como os altos valores de DQO, Sólidos Totais,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ , Amônia,  $\text{H}_2\text{S}$  e de Coliformes Totais.

Foi verificado para a cor e a turbidez que, muito embora tenha sido necessária uma diluição prévia para a detecção, mesmo assim, as amostras de lixiviado se apresentaram bastante concentradas, o que se tornaria um sério risco para a biota se o mesmo fosse lançado em um corpo hídrico caso fossem próximas a relação da vazão de efluentes do lisímetro com o manancial de que o ia receber.

Quanto ao pH, não foram constatadas variações bruscas, o que se deve à alta concentração dos valores de alcalinidade, haja vista que o processo de degradação dos resíduos está relacionado diretamente com a produção de carbonatos e bicarbonatos.

Nos intervalos entre as leituras de biogás percebeu-se que as maiores concentrações ocorreram nos minutos iniciais, o que indica a presença de bolsões de gás acumulados entre as massas de resíduos e que, com a continuidade da purga pelo equipamento, o teor acumulado tende a decair e, posteriormente, se tornar constante.

Foi observado que os microrganismos continuam degradando e produzindo gás, entretanto, não tão intensamente, por conta de já ter ocorrido uma certa estabilização na degradação da matéria orgânica. Por conta dos maiores valores serem determinados nas bases dos lisímetros, constata-se a existência de uma relação direta entre os gases e os lixiviados produzidos.

Pelos valores encontrados de DQO e sólidos voláteis, nota-se a presença de grande quantidade da fração orgânica no lixiviado as altas concentrações de amônia indicam uma certa intensidade no processo de biodegradação.

Nas medições feitas nos lisímetros verificou-se que a temperatura esteve na faixa de 26° C a 38°, sendo uma faixa propícia à atividade das bactérias mesófilas.

Quanto ao H<sub>2</sub>S, as maiores concentrações foram determinadas no L02 e L03, entretanto, observa-se no L03 uma brusca variação na concentração da base para o meio, justamente por se ter um maior volume de lixiviado naquele lisímetro.

Os altos valores encontrados para o gás sulfídrico, principalmente no L03, indicam que pode ter ocorrido uma competição por compostos orgânicos entre as bactérias metanogênicas e sulfetogênicas. Se não tivesse acontecido, boa parte do biogás poderia ter sido convertida em metano e se acrescentar à soma para fins energéticos.

Por conta da ausência de chuvas entre outubro e dezembro de 2013 e da baixa precipitação em janeiro de 2014, os valores obtidos para metano e dióxido de carbono foram muito baixos em fevereiro, principalmente no L02 e L01. Nos meses de maio e junho, após algumas chuvas na área da pesquisa, os valores obtidos para esses gases foram bem maiores, principalmente nas bases do L02 e L03, possivelmente por conta do acréscimo de lixiviado.

Foi constatada a grande influência da composição dos resíduos orgânicos na geração de gases, e na produção de lixiviado, comparando-se os valores determinados para a base do lisímetro L03 (preenchido 100% com material orgânico) com os da base do lisímetro L01 (preenchido 100% com resíduos na forma que chegam ao aterro).

Muitos dos parâmetros físico-químicos e bacteriológicos encontrados nos lixiviados do L02 e L03 se apresentam em elevadas concentrações para o lançamentos em recursos hídricos, portanto, quando da execução de aterros sanitário, deverão ser adotadas medidas para que não ocorra



contaminação do lençol freático, como também não haja lançamentos em corpos hídricos sem o devido tratamento prévio, sendo a recirculação um auxílio promissor.

Nos aterros sanitários existe grande viabilidade de coleta dos gases para aproveitamento, principalmente o  $\text{CH}_4$ , reforçando-se que suas concentrações serão maiores se a quantidade de resíduos orgânicos for grande, o que justifica uma prévia coleta seletiva dos materiais inorgânicos antes do descarte nos aterros.

As precipitações pluviométricas, juntamente com a formação de lixiviado e aumento da umidade, refletem na concentração e formação de gases. Assim, a recirculação do lixiviado e sua homogeneização em toda a massa de resíduos podem resultar em maior produção de biogás, constituindo-se portanto, uma alternativa indicada para o aumento da geração de metano em aterros sanitários.

Para continuidade deste trabalho, recomendam-se:

- Estudar a influência da recirculação do lixiviado nos lisímetros sobre a geração de gases;
- Monitorar com maior frequência a influência das precipitações pluviométricas na formação do lixiviado e, secundariamente, na geração de gases;
- Avaliar a possibilidade da injeção de ar nos lisímetros, como mecanismo de remoção de  $\text{H}_2\text{S}$ ;
- Isolar os grupos de microrganismos presentes no lixiviado e realizar levantamento das espécies mais adaptadas para a formação de  $\text{CH}_4$ ;
- Estudar a geração de biogás em lisímetros preenchidos com outros tipos de resíduos.

## REFERÊNCIAS

- ABUSHAMMALA et al. Estimation of methane emission from landfills in Malaysia using the IPCC 2006 FOD Model. **Journal of Applied Sciences**, v.10, n.15, p.1603-1609, jun., 2010.
- AGÊNCIA NACIONAL DE VIGILÂNCIA SANITÁRIA - ANVISA. **Manual de Microbiologia Clínica para o Controle de Infecção em Serviços de Saúde** -1 ed. Edição Comemorativa para o IX Congresso Brasileiros de Controle de Infecção e Epidemiologia Hospitalar, Salvador, 2004. Disponível em: <[http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual\\_microbiologia\\_completo.pdf](http://bvsmms.saude.gov.br/bvs/publicacoes/manual_microbiologia_completo.pdf)> Acesso em 11 set. 2013
- ALCANTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. Tese de Doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife-PE. 366p, 2007.
- ANDRADE, J. **Tratamento de percolados de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos enfatizando o uso de Processos Oxidativos Avançados**. Disciplina – Processos Oxidativos Avançados no Tratamento de Efluentes – PEQ/COPPE/UFRJ, janeiro 2001.
- APHA, AWWA, WEF - AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21. ed. Washington: American Public Health Association, 2005.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2012**. São Paulo, SP. 2012.
- \_\_\_\_\_. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil de 2013**. São Paulo, SP. 2013.
- BAHR, T.; FRICKE, K; HILLEBRECHT, K.; KOLSH, F.; REINHARD, B. **Clean Development Mechanism – Tratamento de resíduos sólidos e oxidação de gás metano para minimização de emissões**. 2006.
- BARLAZ, M. Microbiology of Solid Waste Landfills. **Microbiology of Solid Waste**, ed. Palmisano et Barlaz. CRC PRESS Boca Roton. Florida. NY. Cap. 2, 1996.
- BASSANI, F. **Monitoramento do Lixiviado do Aterro Controlado de Maringá, Paraná, e Avaliação da tratabilidade com Coagulantes Naturais, Radiação Ultravioleta (UV) e Ozônio**. 2010, 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Urbana). Universidade Estadual de Maringá, Maringá, 2010.
- BRASIL, REPÚBLICA FEDERATIVA DO. Plano Nacional dos Resíduos Sólidos Brasília - DF, 2012. Disponível em: <[www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS-consultaspublicas.pdf](http://www.mma.gov.br/port/conama/reuniao/dir1529/PNRS-consultaspublicas.pdf)>. Acesso em: 18 març. de 2014.

\_\_\_\_\_. Lei nº 12.305/2010 - Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e dá outras providências. Congresso Nacional, **D.O.U.** 03/08/2010, Brasília - DF, 2010.

\_\_\_\_\_. Decreto nº 7.404/2010 – regulamenta a Lei nº 12.305/2010. Congresso Nacional, **D.O.U.** 23/12/2010, Brasília - DF, 2010.

\_\_\_\_\_. RESOLUÇÃO Nº 357, DE 17 DE MARÇO DE 2005 - Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Congresso Nacional, **D.O.U.** 18/03/2005, Brasília - DF, 2005.

\_\_\_\_\_. RESOLUÇÃO Nº 430, DE 13 DE MAIO DE 2011 - Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de Março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA. Congresso Nacional, **D.O.U.** 16/05/2011, Brasília - DF, 2011.

CASTILHOS JÚNIOR, A. B.; GOMES, L. P.; PESSIN, N. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte.** Rio de Janeiro, ABES, Projeto PROSAB, 294p., 2003.

CASTILHOS Jr, A. B.; PESSIN, N.; FERNANDES, F. et al. **Gerenciamento de Resíduos Sólidos Urbanos com Ênfase na Proteção de Corpos D'água: Prevenção, Geração e Tratamento de Lixiviados de Aterros Sanitários.** Prosab – Rede Cooperativa de Pesquisas. Santa Catarina, 2006.

CATAPRETA, C.A.A. **Comportamento de um Aterro Sanitário Experimental: Avaliação da Influência do Projeto, Construção e Operação.** 316p. Tese (Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos). Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

CLEMENT, B.. **Physical-chemical characterization of 25 french landfill leachates,** In Proceedings Sardinia 95, Fifth International Landfill Symposium. Caligari (Italy): CISA, 1995.

COELHO, H. M. G. **Avaliação da influência de camadas de cobertura intermediárias e finais na degradação de resíduos sólidos urbanos e na geração de lixiviados.** Belo Horizonte: EE-UFGM, 2005. 160 p. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

COMPROMISSO EMPRESARIAL PARA RECICLAGEM – CEMPRE. **Pesquisa CICLOSOFT.** Brasil, 2002. Disponível em: < URL: [http:// www.cempre.com.br](http://www.cempre.com.br)>. Acesso em: 06 set. 2013.

\_\_\_\_\_. **LIXO MUNICIPAL: MANUAL DE GERENCIAMENTO.** São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas: 1995.

CONEJERO, M. A. **Marketing de créditos de carbono: Um estudo exploratório.** (Dissertação Mestrado em Administração de Organizações) – Administração e Contabilidade, Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto, 2006.

DE MATOS, A. R. V. **Contribuição para o estudo da influência da recirculação de lixiviados no comportamento de aterros de resíduos sólidos urbanos.** (Dissertação de Mestrado). Universidade de Nova Lisboa. Lisboa, Portugal. 2008.

DOS SANTOS, V. C. **Projeto, construção e instrumentação de um lisímetro em escala de laboratório para estudos em resíduos sólidos.** 2010. 105p. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Ambiental). Faculdade de Engenharia e Arquitetura, Universidade de Passo Fundo. Passo Fundo, RS. 2010.

EDUARDO, J. **Avaliação das características microbiológicas e físico-químicas do lixiviado (chorume) no processo de tratamento do Aterro Metropolitano de Gramacho(Rj-Brasil).** 2007.98p. Dissertação (Mestrado em Meio Ambiente). Faculdade de Engenharia, Universidade do Estado do Rio Janeiro, Rio Janeiro,2007.

ENVIRONMENT AGENCY. **Guidance on monitoring landfill gas surface emissions.** Inglaterra, 63 p, 2004.

ESTEVES, F de Assis. **Fundamentos de Limnologia.** 3ª ed. Rio de Janeiro, RJ. Editora, Interciências, 2012.

EUROPEAN ENVIRONMENT AGENCY - EEA. **Greenhouse gas emission trends and projections in Europe 2004.** Report 5/2004, Progress EU and its member states towards achieving their Kyoto targets: Luxembourg, 40p. 2004.

FERNANDES, J. G. **Estudo da emissão de biogás em um aterro sanitário experimental.** (Dissertação de Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia. 2009.

FIGUEIREDO, P.J.M. **A sociedade do lixo.** Editora Hemus, 2 ed. Piracicaba, SP, 1995.

FILHO, L. F. B., **Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos.** (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2005.

FISCHER, C.; MAURICE, C.; LAGERKVIST, A. **Gas Emission from Landfills an overview of issues and research needs.** Swedish Environmental Protection Agency, Stockholm, Sweden.55p, 1999.

FONSECA, E. **Iniciação ao Estudo dos Resíduos Sólidos e da Limpeza Urbana,** 2ª ed. – [S/Cidade]: JRC Editora, 2001.

FULLER, W.H., ALESII, B.A., CARTER, G.E., Behavior of municipal solid waste leachate, I. composition variations, **Journal Environment Science Health Letters,** 1979.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS – FUNCEME. **Chuvas na quadra chuvosa ficaram 24% abaixo da média.** Fortaleza, CE, 2014. Disponível em: < URL: <http://www.funceme.br/index.php/listanoticias/361-chuvas-na-quadra-chuvosa-de-2014-ficaram-24-abaixo-da-media>>. Acesso em: 19 jun. 2014.

\_\_\_\_\_. **Postos pluviométricos.** Fortaleza, CE, 2014, Disponível em: <<http://www.funceme.br/index.php/areas/rede-de-monitoramento/postos-pluviometricos>>. Acesso em: 30 jun. 2014.

GIORDANO, G. **Análise e formulação de processos de tratamento dos chorumes gerados em um aterro de resíduos sólidos urbanos.** 2003. 257p. Tese (doutorado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Ciência dos Materiais e Metalurgia, 2003.

HAMADA, J. Estimativa de geração e caracterização do chorume em aterros sanitários. **In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**, 19, 1997, Foz do Iguaçu. Anais...: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 1997. p. 1801-1810.

HUMER, M.; LECHNER, P. Alternative approach to the elimination of greenhouse gases from old landfills. **Waste Management & Research**, v.17, p 443-452, 1999.

INSTITUTO DE PESQUISA APLICADA - IPEA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos.** Brasília, DF. 2012.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS - IPT. **Lixo municipal: manual de gerenciamento integrado.** São Paulo: IPT, 2. 2000.

INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION - ISWA. **Landfill operational guidelines.** Prepared by ISWA Working Group on Landfill, 2, 106 p., 2010.

JOHANSEN, O.J., CARLSON, D.A. Characterization of sanitary landfill leachates. **Water Research**, 1976.

JOHANNESSEN, L. M. **Guidance note on recuperation of landfill gas from municipal solid waste landfills.** The International Bank for Reconstruction and Development/THE WORLD BANK, Working Paper Series, Washington, D.C., 23p. 1999.

JUCÁ, J. F. T. **Destinação Final dos Resíduos Sólidos no Brasil: Situação Atual e Perspectivas.** In: SILUBESA - Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Braga, Portugal, 2002.

JUCÁ, J. F. T. **Avaliação do Potencial Energético do biogás Proveniente de Aterros de Resíduos Sólidos.** Projeto de Pesquisa – PRONEX-2004. Recife, PE. 2003.

KJELDSSEN, P.; FISCHER, E. V. **Landfill gas migration - field investigations at skellingsted landfill, Denmark.** Waste Management, v.13, n.5, p.467-484, sep., 1995.

LEMA, J.M., IBANEZ, E., CANALS, J. Anaerobic treatment of landfill leachates: kinetics and stoichiometry. **Environment Tecnology Letters**, v.8, 1987.

LEVY, J.; CABEÇAS, A. **Resíduos Sólidos Urbanos, Princípios e Processos.** AEPSA - Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 2006.

LIAO, P. H.; CHEN, A.; LO, K. V. **Removal of nitrogen from swine manure wastewaters by ammonia stripping**. *Bioresource Technology*, v. 54, pp. 17-20, 1995.

LO, I. M. C. Characteristics and treatment of leachates from domestic landfills. **Environment International**, v. 22, n. 4, pp. 433-442, 1996.

MELO, M.C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da muribeca**. 127p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências Departamento de Engenharia Civil. Recife, 2003.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília - DF, 2012.

MOTA, S. **Introdução a Engenharia Ambiental** – 5ª. ed. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2012.

MOURA, D. A. G. **Remoção de amônia por arraste com ar de lixiviados de aterros sanitários**. 131p. Dissertação (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Rio de Janeiro, 2008.

OLIVEIRA, M. R. L.; MOTA, S. **Caracterização do Percolado do lixão do Jangurussu, Fortaleza, Ceará**. *Revista de Limpeza Pública*. Brasil, nº 48, 1998.

OLIVEIRA, S. de & PASQUAL, A. **Monitoramento do Lixiviado de Aterro Sanitário**. In: XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. *Anais...* Porto Alegre, 3 a 8 Dezembro de 2000.

OLIVEIRA, F. J. S.; JUCÁ, J. F. T. Acúmulo de metais pesados e capacidades do solo imediatamente abaixo de uma célula de um aterro de resíduos sólidos. **Eng Sanitária e Ambiental**, v. 9, n. 3, 2004.

PUBLIC-PRIVATE INFRASTRUCTURE ADVISORY FACILITY – PPIAF. **Resíduos sólidos urbanos**. 2011. Disponível em: <<http://www.ppiaf.org/sites/ppiaf.org/files/publication/Brazil-Solidwaste-Portu.pdf>>. Acesso em: 09 set. 2013.

REINHART, D. R.; AL-YOUSFI, A. B. **The impact of leachate recirculation on municipal solid waste landfill operating characteristics**. *Wast Management e Reserch*. v. 14, p. 337 – 346, 1996.

ROBINSON, H.D.; MARIS, P.J. **Leachate from domestic waste: generation, composition and treatment**. A review, WCR-Technical Report-TR 108, March 1979.

SANTOS, G. O; HILUY, J. J. Estudo da Geração de Biogás no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - ASMOC-CE. Fortaleza, CE. 2009.

SANTOS, G. O. **Avaliação do cultivo de gramíneas na superfície de aterro sanitário, com ênfase para a redução da emissão de metano e dióxido de carbono para a atmosfera**. 2013. 313 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2012.

SEGATO, L. MATURANA. Caracterização do Chorume do Aterro Sanitário de Bauru. **IN: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 27, 2000, Porto Alegre. Anais... Associação Brasileira de Engenharia Sanitária, 2000.

SCHNEIDER, I. A. H.; NAIME, R.; CAUDURO, F. Qualidade das Águas em uma Antiga Área de Recebimento de Resíduos Sólidos Urbanos de Passo Fundo – RS. In: **XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**. Anais... Porto Alegre, 3 a 8 Dezembro de 2000.

SILVA, N.; JUNQUEIRA, V. C. A.; SILVEIRA, N. F. A. **Manual de métodos de análise microbiológica de alimentos**. São Paulo: Varela, 1997. 295p.

SILVA, A. K. M Da. **Estudo do comportamento dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em lisímetros preenchidos com resíduos de diferentes características**. 2013. 203 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2013.

TATSI, A.A., ZOUBOULIS, A.I. A field investigation of the quantity and quality of leachate from a municipal solid waste landfill in a Mediterranean climate (Thessaloniki, Greece). **Advances in Environmental Research**, v. 6, 2002.

THEMELIS, N. J.; ULLOA, P. A. **Methane generation in landfills**. Renewable Energy, v.32, n.7, p.1243-1257, aug ., 2007.

TCHOBANOGLIOUS, G., THESSSEN, H., VIGIL, S. A. Composicion y características, generacion, movimiento y control de los gases de vertedoro. **Gestion Integral de Resíduos Sólidos**, v.1, Mc Graw Hill., 1994.

UNITED STATES ARMY CORPS OF ENGINEERS - USACE. **Landfill off-gas collection and treatment systems**. Washington, D.C., USACE, 2008. 15p. Disponível em: <http://140.194.76.129/publications/eng-manuals/em1110-1-4016/entire.pdf>. Acesso: 25 set. 2011.

UNITED STATES ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - USEPA. **Air emissions from municipal solid waste landfills – background information for proposed standards and guidelines**. Emissions Standards Division. EPA-450/3-90-011a. Março 1991.

VON SERLING, M. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3ª Ed. Belo Horizonte. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

ZHANG, H.; HE, P.; SHAO, L. Methane emissions from MSW landfill with sandy soil covers under leachate recirculation and subsurface irrigation. **Atmospheric Environment**, v.42, n.22, p. 5579-5588, jul., 2008.