



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO  
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LAÍS CHAVES GUILHERME

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS GEOAMBIENTAIS DO  
MONITORAMENTO PÓS-ENCERRAMENTO DO ATERRO DE MURIBECA-PE**

Recife  
2019

LAÍS CHAVES GUILHERME

**ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS GEOAMBIENTAIS DO  
MONITORAMENTO PÓS-ENCERRAMENTO DO ATERRO DE MURIBECA-PE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

**Área de concentração:** Geotecnia.

**Orientador:** Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá

Recife

2019

G956a      Guilherme, Laís Chaves.

Análise da evolução dos parâmetros geoambientais do monitoramento pós-  
encerramento do aterro de Muribeca-PE / Laís Chaves Guilherme. – 2019.

105 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2019.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Geotecnia Ambiental. 3. Monitoramento ambiental. 4.  
Encerramento de aterros sanitários. I. Jucá, José Fernando Thomé. (Orientador). II.  
Título.

# **ANÁLISE DA EVOLUÇÃO DOS PARÂMETROS GEOAMBIENTAIS DO MONITORAMENTO PÓS-ENCERRAMENTO DO ATERRO DE MURIBECA-PE**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Aprovada em: 30/07/2019.

## **BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá (Orientador)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Maria Odete Holanda Mariano (Examinador Interno)  
Universidade Federal de Pernambuco

---

Prof. Dr. Eduardo Antônio Maia Lins (Examinador Externo)  
Instituto Federal de Pernambuco

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Senhor meu Deus, por me permitir superar cada desafio e me amparar nas horas de desespero, não me deixando desistir.

À minha mãe, Sandra Maria, que sempre fez o impossível para que eu pudesse correr atrás de cada um dos meus sonhos.

Aos meus familiares, por todos os dias me lembrarem de que nunca se está sozinho quando se tem família.

A todos os meus amigos, que aguentaram cada um dos meus tropeços e me ajudaram a levantar, continuar lutando e acreditando. Em especial à Italcy, Hassyla, Suzana, Rayane, Karlla, Mario, Alia, Isabel e Miguel.

Ao Prof. Dr. José Fernando Thomé Jucá, que além de meu orientador, foi um amigo paciente que acreditou no meu potencial.

Ao CNPQ, pelo financiamento à bolsa que me proporcionou a oportunidade de crescimento acadêmico.

À Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana (EMLURB), em especial à Eng.<sup>a</sup> Ana Sofia e ao Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE (GRS), que me proporcionaram amplo acesso ao local de pesquisa e banco de dados.

## RESUMO

O monitoramento ambiental de um aterro de resíduos sólidos encerrado possibilita identificar possíveis contaminações, atestar a eficácia do projeto de encerramento e, ainda, comprovar a possibilidade de uso futuro de uma determinada área. O objetivo desse trabalho foi analisar o processo de inertização da massa de resíduos sólidos do Aterro da Muribeca, localizado na região metropolitana do Recife, Pernambuco. Para tanto, foram utilizados dados provenientes do monitoramento pós encerramento por nove anos (2009-2018), analisando-se o tempo a evolução dos parâmetros de compressibilidade dos resíduos, fluxo e emissões de biogás, quantidade e qualidade do lixiviado, através estatística descritiva e o método de decomposição clássica de séries temporais. A evolução dos recalques apresentou uma tendência a estabilização desde o ano de 2016, tendo as máximas variando de 2.750mm para 45mm, resultando em uma redução de 98%. As velocidades de recalques também tiveram uma redução semelhante. A deformação específica vertical calculada para todo o período de pós-encerramento do aterro está contida na faixa entre 0,4 a 8%. O monitoramento de biogás através camada de cobertura não detectou emissões desde o ano de 2016. Neste mesmo período o fluxo de biogás nos drenos teve uma redução máxima de 49%. Em relação a concentração do lixiviado, os resultados mais significativos no período de 2009 a 2018 foram as concentrações de sulfetos que teve aumento de cerca de 250%, com valor atual de 1,67 mg/l, demonstrando uma tendência de estabilização da massa de resíduos. Os parâmetros biológicos de contagem de microrganismos (coliformes fecais decaíram de  $10^8$  para  $10^5$ , enquanto que os coliformes totais decaíram de  $10^8$  a  $10^6$ ), junto a cor de 8.500 para 211 Hazen, foram os parâmetros com maior decréscimo no período totalizando reduções de cerca de 98%. A Demanda Bioquímica de Oxigênio atual é de 204 mg/l, tendo decaído 78% no período. A relação entre a demanda bioquímica e química de oxigênio atual é de 0,15 tendo reduzido 70% no período, demonstrando uma redução no processo de biodegradação. No período do estudo o pH se manteve com um valor médio de 8. Estas concentrações permitem concluir que o aterro se encontra na etapa metanogênica, mas, evidenciando-se ainda como uma fonte de contaminação ambiental.

**Palavras-chave:** Geotecnia Ambiental. Monitoramento ambiental. Encerramento de aterros sanitários.

## ABSTRACT

The environmental monitoring of an enclosed solid waste landfill makes it possible to identify possible contaminations, attest to the effectiveness of the closure project and also prove the possibility of future use of a particular area. The objective of this work is to analyze the process of inertization of solid waste mass of Muribeca Landfill, located in the metropolitan region of Recife, Pernambuco. Therefore, data from post-closure monitoring were used for nine years (2009-2018), the evolution of the compressibility parameters of the residues, flow and biogas emissions, quantity and quality of the leachate were analyzed over time using descriptive statistics and the classical decomposition method of time series. The evolution of the settlements shows a tendency to stabilization since the year 2016, with the maximums varied from 2,750mm to 45mm, resulting in a reduction of 98%. The speed of settlements also had a similar reduction. The specific vertical deformation calculated for the entire post-closure period of the landfill is in the range of 8.0 to 0.4%. The monitoring of biogas through the cover layer did not detect emissions since the year 2016. During this same period the flow of biogas in the drains had a maximum reduction of 49%. In relation to the concentration of the leachate, the most significant results in the period from 2009 to 2018 were the sulphide concentrations that increased by about 250%, with a current value of 1,67 mg / l, demonstrating a trend of stabilization of the mass of waste. Biological parameters for counting microorganisms (fecal coliforms decreased from  $10^8$  to  $10^5$ , while total coliforms decreased from  $10^8$  to  $10^6$ ), along with the color of 8,500 for 211 Hazen, were the parameters with the greatest decrease in the period, totaling reductions of about 98%. The present Biochemical Oxygen Demand is 204 mg / l, having dropped 78% in the period. The ratio between the current biochemical and chemical oxygen demand is 0.15, reducing by 70% in the period, demonstrating a reduction in the biodegradation process. In the period of the study the pH remained with an average value of 8. These concentrations allow to conclude that the landfill is in methanogenesis and is still a source of environmental contamination.

**Keywords:** Environmental Geotechnics. Environmental monitoring. Closure of Solid Waste Landfills.

## LISTA DE FIGURAS

|             |                                                                                            |    |
|-------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 –  | Curva tempo-recalque de um aterro baseado na proposta de Grisolia e Napoleoni (1995) ..... | 21 |
| Figura 2 –  | Esquema de medições de movimentações superficiais ....                                     | 22 |
| Figura 3 –  | Variação da composição dos gases do aterro com o tempo .....                               | 27 |
| Figura 4 –  | Reações de decomposição e produção de gases em um aterro .....                             | 28 |
| Figura 5 –  | Localização em mapa do aterro da Muribeca .....                                            | 41 |
| Figura 6 –  | Vista aérea do Aterro Controlado da Muribeca/PE, ano 2009 .....                            | 41 |
| Figura 7 –  | Localização das placas de recalque nas células 7 e 8 do aterro da Muribeca .....           | 46 |
| Figura 8 –  | Marco superficial e esquema ilustrativo de medição de recalques .....                      | 46 |
| Figura 9 –  | Distribuição espacial dos drenos de gases do Aterro Muribeca, relatório EMLURB 2017 .....  | 48 |
| Figura 10 – | Equipamentos utilizados para ensaio de Placa .....                                         | 49 |
| Figura 11 – | Estação de Tratamento de Lixiviados do Aterro da Muribeca .....                            | 50 |
| Figura 12 – | Coleta de amostras de lixiviado bruto Muribeca .....                                       | 51 |

## LISTA DE GRÁFICOS

|              |                                                               |    |
|--------------|---------------------------------------------------------------|----|
| Gráfico 1 –  | Estado da Arte por Tipo de publicação .....                   | 36 |
| Gráfico 2 –  | Divisão do Estado da Arte por tema .....                      | 36 |
| Gráfico 3 –  | Recalque do resíduo com o tempo .....                         | 54 |
| Gráfico 4 –  | Velocidade de recalque pelo tempo .....                       | 54 |
| Gráfico 5 –  | Emissões de Biogás da Célula 1 .....                          | 59 |
| Gráfico 6 –  | Emissões de Biogás da Célula 2 .....                          | 59 |
| Gráfico 7 –  | Emissões de Biogás da Célula 3 .....                          | 60 |
| Gráfico 8 –  | Emissões de Biogás da Célula 4 .....                          | 60 |
| Gráfico 9 –  | Emissões de Biogás da Célula 5 .....                          | 61 |
| Gráfico 10 – | Emissões de Biogás da Célula 6 .....                          | 62 |
| Gráfico 11 – | Emissões de Biogás da Célula 7 .....                          | 62 |
| Gráfico 12 – | Emissões de Biogás da Célula 8 .....                          | 63 |
| Gráfico 13 – | Emissões de Biogás da Célula 9 .....                          | 64 |
| Gráfico 14 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 1 (m3/dia) .....         | 67 |
| Gráfico 15 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 2 (m3/dia) .....         | 68 |
| Gráfico 16 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 3 (m3/dia) .....         | 68 |
| Gráfico 17 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 4 (m3/dia) .....         | 69 |
| Gráfico 18 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 5 (m3/dia) .....         | 69 |
| Gráfico 19 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 6 (m3/dia) .....         | 70 |
| Gráfico 20 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 7 (m3/dia) .....         | 70 |
| Gráfico 21 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 8 (m3/dia) .....         | 71 |
| Gráfico 22 – | Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 9 (m3/dia) .....         | 71 |
| Gráfico 23 – | Vazão média Mensal x Precipitação .....                       | 73 |
| Gráfico 24 – | pH do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....              | 74 |
| Gráfico 25 – | Alcalinidade do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....    | 75 |
| Gráfico 26 – | Condutividade do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .       | 77 |
| Gráfico 27 – | DBO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....             | 77 |
| Gráfico 28 – | DQO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....             | 78 |
| Gráfico 29 – | Relação DBO/DQO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo ..... | 78 |
| Gráfico 30 – | Nitrogênio Amoniacal Total do Lixiviado Bruto da              | 79 |

|              |                                                                     |    |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|----|
|              | Muribeca no tempo .....                                             |    |
| Gráfico 31 – | Turbidez do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....              | 81 |
| Gráfico 32 – | Cor do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....                   | 81 |
| Gráfico 33 – | Sólidos Sedimentáveis do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo ..... | 83 |
| Gráfico 34 – | Sulfetos do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....              | 83 |
| Gráfico 35 – | Coliformes Totais do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....     | 84 |
| Gráfico 36 – | Coliformes Fecais do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo .....     | 85 |

## LISTA DE TABELAS

|             |                                                                                    |    |
|-------------|------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 –  | Faixas Típicas de Composição de Biogás .....                                       | 25 |
| Tabela 2 –  | Composição Típica de Lixiviado por Frank e Tchobanoglous .....                     | 30 |
| Tabela 3 –  | Composição Típica de Lixiviado por Lee et al .....                                 | 31 |
| Tabela 4 –  | Composição Típica de Lixiviado por Fuziah et al .....                              | 31 |
| Tabela 5 –  | Composição Típica de Lixiviado por Bhalla .....                                    | 32 |
| Tabela 6 –  | Composição Típica de Lixiviado por Naveen et al .....                              | 32 |
| Tabela 7 –  | Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Pohland e Harper .....                  | 33 |
| Tabela 8 –  | Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Kjedsen et al .....                     | 34 |
| Tabela 9 –  | Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Sousa .....                             | 34 |
| Tabela 10 – | Construções sob antigos depósitos no Brasil .....                                  | 38 |
| Tabela 11 – | Caracterização das células do aterro da Muribeca/PE .....                          | 42 |
| Tabela 12 – | Periodicidade do monitoramento ambiental .....                                     | 45 |
| Tabela 13 – | Principais análises realizadas para caracterização do lixiviado .....              | 52 |
| Tabela 14 – | Resultados de recalque .....                                                       | 55 |
| Tabela 15 – | Emissões de biogás pelos drenos Muribeca-PE, anos de 2010-2011 .....               | 65 |
| Tabela 16 – | Emissões de biogás pelos drenos Muribeca-PE, ano de 2013 .....                     | 66 |
| Tabela 17 – | Emissões de biogás pelos drenos Muribeca-PE, ano de 2018 .....                     | 66 |
| Tabela 18 – | Emissões de biogás pelos drenos Muribeca-PE, 2010 a 2018 .....                     | 66 |
| Tabela 19 – | Monitoramento da vazão média mensal do lixiviado bruto do aterro da Muribeca ..... | 72 |
| Tabela 20 – | Parâmetros do lixiviado: 1 ano pós-encerramento X 9 anos pós-encerramento .....    | 86 |
| Tabela 21 – | Faixa típica de valores para lixiviado em aterros antigos ..                       | 87 |

## SUMÁRIO

|              |                                                                     |           |
|--------------|---------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>     | <b>INTRODUÇÃO .....</b>                                             | <b>13</b> |
| 1.1          | CONSIDERAÇÕES GERAIS .....                                          | 13        |
| 1.2          | JUSTIFICATIVA .....                                                 | 14        |
| 1.3          | OBJETIVOS .....                                                     | 15        |
| <b>1.3.1</b> | <b>Objetivo Geral .....</b>                                         | <b>15</b> |
| <b>1.3.2</b> | <b>Objetivos Específicos .....</b>                                  | <b>15</b> |
| 1.4          | ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO .....                                      | 16        |
| <b>2</b>     | <b>REVISÃO DA LITERATURA .....</b>                                  | <b>17</b> |
| 2.1          | PÓS- ENCERRAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS .....                       | 17        |
| <b>2.1.1</b> | <b>Cuidados Pós-Encerramento de Aterros .....</b>                   | <b>18</b> |
| 2.2          | MONITORAMENTO AMBIENTAL .....                                       | 19        |
| 2.3          | MONITORAMENTO DOS RECALQUES .....                                   | 20        |
| <b>2.3.1</b> | <b>Fatores Intervenientes no Recalque .....</b>                     | <b>23</b> |
| 2.4          | MONITORAMENTO DO BIOGÁS .....                                       | 24        |
| <b>2.4.1</b> | <b>Variações na Composição do Biogás .....</b>                      | <b>26</b> |
| 2.5          | MONITORAMENTO DE LÍQUIDOS E LIXIVIADOS .....                        | 29        |
| <b>2.5.1</b> | <b>Variações na composição do lixiviado .....</b>                   | <b>29</b> |
| 2.6          | PESQUISAS SOBRE O TEMA NO BRASIL .....                              | 35        |
| 2.7          | USOS FUTUROS PARA LOCAIS DE ATERROS ENCERRADOS ....                 | 37        |
| <b>3</b>     | <b>METODOLOGIA .....</b>                                            | <b>39</b> |
| 3.1          | LOCAL DE ESTUDO: HISTÓRICO DO ATERRO .....                          | 40        |
| 3.2          | ENCERRAMENTO DO ATERRO DA MURIBECA .....                            | 43        |
| 3.3          | MONITORAMENTO AMBIENTAL PÓS-ENCERRAMENTO .....                      | 44        |
| 3.4          | MONITORAMENTO GEOMECÂNICO .....                                     | 45        |
| 3.5          | MONITORAMENTO DO BIOGÁS .....                                       | 47        |
| 3.6          | MONITORAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS .....                         | 50        |
| <b>4</b>     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>                                 | <b>53</b> |
| 4.1          | RECALQUES .....                                                     | 53        |
| 4.2          | GASES .....                                                         | 57        |
| <b>4.2.1</b> | <b>Análise das tendências de fluxo de biogás pelos Drenos .....</b> | <b>67</b> |
| 4.3          | LIXIVIADO .....                                                     | 72        |

|       |                                                                 |           |
|-------|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 4.4   | ANÁLISE PARAMÉTRICA DO LIXIVIADO .....                          | 86        |
| 4.4.1 | <b>Análise das tendências dos parâmetros de lixiviado .....</b> | <b>87</b> |
| 5     | <b>CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS .....</b>        | <b>89</b> |
| 5.1   | CONCLUSÕES .....                                                | 89        |
| 5.2   | PERSPECTIVAS FUTURAS .....                                      | 90        |
|       | <b>REFERÊNCIAS .....</b>                                        | <b>91</b> |
|       | <b>APÊNDICE A – ESTADO DA ARTE DO TEMA .....</b>                | <b>97</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

A Associação Internacional de Resíduos Sólidos (ISWA) constatou que lixões são as maiores fontes de contaminação, realizando uma campanha no final do ano de 2016, com o objetivo de encerrar os 50 maiores do mundo. No Brasil, em agosto de 2010, foi aprovada a Lei 12.305 que determinava o fechamento de lixões e aterros controlados até o prazo de 3 de agosto de 2014.

Oito anos após a implementação do projeto de lei supracitado, o panorama de disposição de resíduos no Brasil revela que 29,3 milhões de toneladas de resíduos ainda são depositados em aterros controlados ou lixões, ou seja, 40,9% do total de resíduos ainda tem destinação final inadequada (ABRELPE, 2017). Segundo a ISWA no ano de 2017 ainda haviam quase 3.000 lixões identificados no país.

Apesar do prazo para encerramento ter sido prorrogado para 2021 (PL 2289/15) nota-se uma crescente preocupação em relação ao término das disposições finais inadequadas. Entretanto, essa mesma preocupação não é visível no tocante aos cuidados demandados após o fim do uso dos depósitos. A título de exemplo no Brasil, não há normativas acerca dos procedimentos cabíveis para o correto encerramento, processo de manutenção das estruturas ou monitoramento ambiental de aterros encerrados.

### 1.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Um aterro sanitário possui vida útil de 20 a 25 anos e após atingir sua capacidade, faz-se necessário o projeto de encerramento que visa minimizar os impactos remanescentes e realizar a manutenção da área (RECESA, 2008). Tendo em vista que durante o funcionamento, assim como no período pós-encerramento, o aterro é fonte de contaminação, faz-se necessária a realização do monitoramento ambiental, que consiste na análise dos parâmetros físicos, químicos e biológicos apresentados pelos resíduos, pelos poluentes gerados (gases e lixiviado) e áreas de influência (subsolo, águas superficiais e subterrâneas) (CATAPRETA E SIMÕES, 2016).

Por conseguinte, o monitoramento ambiental acarreta custos que continuam após o fim da geração de receitas pelo empreendimento que ocorre durante a operação, com o tempo de cuidados pós-término das atividades podendo variar de 30 a 50 anos (FRANK E TCHOBANOGLOUS, 2002). No Brasil, este período de controle se reduz para 20 anos segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997), podendo ainda ser reduzido caso haja confirmação de que o aterro não produz mais lixiviado.

Atualmente não se possui dados significativos sobre o monitoramento de aterros encerrados, o comportamento de seus parâmetros de contaminação no tempo ou sobre a os riscos ambientais ou a saúde da população próxima. O estudo do comportamento dos parâmetros após o fim da utilização do depósito tem sua importância fundada no fato de fornecer dados pertinentes ao tempo de contaminação, tempo de bioestabilização, auxiliar no processo de tomada de decisão, além de atestar a possibilidade de uso futuro da área, como também auxiliar na projeção de custos demandados nos cuidados pós encerramento.

Este trabalho pretende analisar a evolução temporal dos resultados do monitoramento ambiental do aterro da Muribeca no período pós-encerramento. Tais resultados foram obtidos através do banco de dados do Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE (GRS), fruto de um convênio celebrado entre a EMLURB (Empresa de Manutenção e Limpeza Urbana do Recife) e a UFPE (Universidade Federal de Pernambuco) através da ATEPE (Associação Tecnológica de Pernambuco).

## 1.2 JUSTIFICATIVA

Segundo a FEAM (2010), o alto potencial poluidor das áreas possuidoras de antigos depósitos torna imprescindível o diagnóstico ambiental continuado, sendo necessário o monitoramento das fontes hídricas superficiais e subterrâneas além do solo, do ponto de vista geotécnico e ambiental. Cabe à prefeitura de cada município afetado solicitar ao órgão orientações para que, com assessoria de um corpo técnico especializado realize a elaboração de um Plano de Recuperação de Área Degradada por Aterro Controlado ou Lixão.

A proposta e uso futuro da área dependem do diagnóstico de contaminação do local e seu entorno, levando em consideração aspectos ambientais, financeiros e sociais. Em adição, é necessário que seja considerado o tempo de estabilização da

massa de resíduos para a tomada de decisão. Desta forma, o passivo ambiental configura-se como um potencial risco ao meio ambiente e saúde pública.

Diante do exposto, ressalta-se a importância do estudo no provimento de dados pertinentes à evolução dos parâmetros de recalque, produção de gases e lixiviados e suas respectivas caracterizações para aterros antigos encerrados. A carência de trabalhos com acompanhamento temporal desses dados dificulta a tomada de decisões técnicas no tocante a custos pós-encerramento, recuperação ambiental e uso futuro da área, o que assevera a emergência do presente estudo.

### 1.3 OBJETIVOS

Os objetivos deste trabalho foram divididos em geral e específicos, conforme abaixo.

#### 1.3.1 Objetivo Geral

- Analisar a evolução dos parâmetros geoambientais do monitoramento pós-encerramento do aterro encerrado da Muribeca-PE, a partir da evolução dos parâmetros químicos, físicos e biológicos.

#### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Acompanhar a evolução dos recalques do aterro e correlacionar esses parâmetros com os processos de biodegradação;
- Acompanhar a evolução de quantidade e qualidade de gases e lixiviado gerados, avaliando o comportamento dos mesmos em relação ao tempo;
- Correlacionar aspectos ambientais de pluviometria com os parâmetros do biogás obtidos no estudo;
- Avaliar o efeito da idade do Aterro e suas fases de degradação nas características do lixiviado e gases;

## 1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O trabalho em questão está organizado em seis capítulos, sendo eles:

Capítulo 1: Trata de uma breve contextualização do assunto com apresentação de justificativas e objetivos do estudo.

Capítulo 2: Aborda os cuidados demandados pós encerramento, o monitoramento ambiental especificado em monitoramento de recalques, biogás e parâmetros do lixiviado, correlacionando as variações com o processo biodegradativo da massa de resíduo. Além disso, foram realizados estudos de publicações nacionais e internacionais sobre o tema, como forma de dar suporte a importância e diferenciação do estudo.

Capítulo 3: Trata da Metodologia do Estudo, com a especificação do local e histórico do mesmo, descrição do processo de monitoramento e ensaios utilizados para os resultados observados pertinentes a recalques, gases e lixiviado. Ainda trata da análise estatística aplicada em estudo com descrição do procedimento para análise de tendência através do método clássico de decomposição de séries temporais que resultou nos dados da pesquisa e análise estatística aplicada aos dados em estudo.

Capítulo 4: Trata dos Resultados e Discussão, destacando a análise dos parâmetros com o tempo, são apresentados os resultados de recalque, características do e fluxo de gases nos drenos e camada de cobertura. Assim como a estatística descritiva dos dados e o estudo da tendência por meio de séries temporais.

Capítulo 5: Refere-se às principais conclusões obtidas no estudo, além de propostas para estudos futuros no tocante ao tema abordado.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

A revisão de literatura constitui-se de temas relevantes para a área de estudo abordada neste trabalho. Sendo assim, serão citados trabalhos que contextualizam sobre: pós- encerramento de aterros sanitários, monitoramento ambiental (incluindo requalques, biogás, líquidos e lixiviados), pesquisas sobre o tema no Brasil e usos futuros para locais de aterros encerrados.

### 2.1 PÓS- ENCERRAMENTO DE ATERROS SANITÁRIOS

Após a sanção da Política Nacional de resíduos sólidos (PNRS) em 2010, conforme a lei nº 12.305, regulamentada pelo decreto 7.404/10, houve uma preocupação crescente com o fechamento e adequação dos lixões e aterros no Brasil. Em virtude da PNRS pode ser observado o encerramento de vários depósitos de resíduos a céu aberto por todo o país, emergindo a importância de conhecimentos sobre os cuidados necessários pós-encerramento.

A NBR-13896 (ABNT, 1997) regulamenta as etapas do projeto de um aterro de resíduos não perigosos, denotando a necessidade de um plano de encerramento e atividades demandadas no período pós-encerramento do aterro. Todavia, esta norma, não detalha como tais procedimentos devem ser realizados dando abertura para diferentes delineamentos e gerando projetos sem uniformidade.

Primeiramente, o plano de encerramento deve abarcar medidas a serem tomadas visando minimizar manutenções futuras e evitar ou diminuir a contaminação ambiental proveniente dos passivos gerados pelo aterro. No referido plano devem constar os métodos de fechamento, projeto de construção da camada de cobertura final, estimativa de data para início das atividades de encerramento, previsão de quantidade e qualidade dos resíduos depositados no aterro encerrado, como também os usos programados para o local pós-término de atividades.

Por conseguinte, as atividades após o encerramento objetivam a manutenção e monitoramento da área. A manutenção visa à observação e possíveis reparos nos sistemas de drenagem, cobertura e tratamento de efluente. De acordo com a norma NBR – 13896 (ABNT, 1997), o monitoramento ambiental consiste na análise de

possíveis contaminações que deve ocorrer por um período de 20 anos após o encerramento.

### **2.1.1 Cuidados Pós-Encerramento de Aterros**

Segundo Bagchi e Bhattacharya (2015) os cuidados pós-encerramento podem ser classificados como Longo Período (LP) ou Perpétuo (P), os cuidados de LP seriam o monitoramento, drenagem e destinação do lixiviado que demandariam cerca de 40 anos além da drenagem dos gases que segundo os autores pode perpetuar por cerca de 100 anos.

Os cuidados demandados pela cobertura final se enquadrariam como perpétuos não havendo normativos internacionais para esses, tendo em vista sua função impermeabilizante que visa diminuir tanto a entrada de líquidos quanto a saída de gases, além de promover o ambiente para estabilização vegetal (QUADROS *et al.*, 2018).

A manutenção de estruturas é feita mediante a constante vistoria de pessoa qualificada, responsável por solicitar reparos caso seja necessário. Devem ser vistoriadas avarias nos sistemas de drenagem de líquidos e gases, rupturas e falhas na camada de cobertura, taludes e estruturas de acesso (ALVES, 2010).

O controle e monitoramento ambiental que abrange as análises e acompanhamento das características físico-químico-biológicas dos corpos hídricos superficiais e subterrâneos, assim como dos efluentes (gases e líquidos) que também tem suas vazões monitoradas (CATAPRETA E SIMÕES, 2016). Sendo implantado ainda na fase de construção do aterro e tornando-se atividade essencial no período pós-encerramento.

O plano de monitoramento consiste na documentação dos procedimentos e ensaios a serem feitos, tendo em vista a possibilidade de análise temporal e podendo ser utilizado como ferramenta de diagnóstico de contaminações ou como comprovação do processo de inertização da massa de resíduos (CHU, 2016).

No Brasil não há norma técnica específica para o monitoramento ambiental de aterros ou sobre a manutenção desse monitoramento no período pós-encerramento, além disso, há pouca literatura nacional com esse fim ou demonstrando os resultados de monitoramento por longo período.

As análises do monitoramento ocorrem por meio de coleta de amostras (análise direta) ou por meio da mudança de parâmetros sem necessidade de amostragem (análise indireta). Caso seja comprovada alguma contaminação, medidas de remediação devem ser tomadas, sendo escolhidas a depender da contaminação, contaminante e da severidade da situação (CATAPRETA E SIMÕES, 2016).

## 2.2 MONITORAMENTO AMBIENTAL

O monitoramento ambiental pós-encerramento objetiva identificar e analisar modificações na qualidade do ambiente circundante ao aterro como solo, águas superficiais e subterrâneas e ar. Esse processo baseia-se na interpretação de dados provenientes de análises físico-químico-biológicos dos meios já citados.

Segundo Borges, Vimieiro e Catapreta (2016), o monitoramento acompanha o desempenho geotécnico ambiental do aterro, sendo fonte de informações que permitem que haja conhecimento de alterações de comportamento e proposição de remediações e soluções.

O tempo de monitoramento ambiental pode variar de 30 a 50 anos (FRANK E TCHOBANOGLIOUS, 2002). No Brasil, este período de controle se reduz para 20 anos segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997) podendo esse ser ainda menor caso haja confirmação de que o aterro não produz mais lixiviado.

O processo de monitoramento consiste na análise de dados obtidos por meio de observações em campo, análise de instrumentação instalada no local, análise físico-química e biológica do lixiviado proveniente do aterro, assim como das fontes hídricas na proximidade (subterrâneas e superficiais) e, além disso, também é feito o acompanhamento e análise dos gases que emanam do local. É possível que haja ainda monitoramento do solo e ar do local para que sejam diagnosticadas quaisquer influências (CATAPRETA E SIMÕES, 2016).

Segundo a NBR 13896 (ABNT, 1997), norma que retrata sobre a apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, pode-se constatar a presença em norma brasileira da necessidade do monitoramento ambiental do aterro e áreas sob influência do mesmo. Entretanto, o processo de monitoramento e especificidades do mesmo não é detalhado, sendo permitida a

afirmação de que no país não há normativa para monitoramento ambiental de aterros, sejam eles ativos ou encerrados.

### 2.3 MONITORAMENTO DOS RECALQUES

Um aterro é uma obra de engenharia dinâmica, com sua construção ocorrendo de forma concomitante com o uso e, mesmo após o encerramento das atividades, o local onde foi alocado o resíduo possui mudanças de parâmetros que ocorrem por vários anos mesmo após o término das disposições. Dentre os parâmetros mecânicos, a compreensão do recalque na massa de resíduos é um desafio que exige a junção de conhecimentos de Geotecnia e Bioquímica (MCDUGALL et al. 2018).

Ao contrário do que ocorre em maciços de solos, o recalque em resíduos tem um comportamento peculiar, pois se trata de uma massa composta de diversos materiais (metais, plásticos, papéis, vidros, madeiras, têxteis, resíduos orgânicos, pedras e solos) possuindo assim, uma compressibilidade variável com a sobrecarga e com o passar do tempo, principalmente quando se leva em conta a decomposição (JUCA e ALCANTARA, 2010).

Xei, Xue e Gnanendran (2018) discorrem também que a compressibilidade dos resíduos é influenciada pelas condições ambientais e com o passar do tempo, sendo o comportamento de recalque de um aterro dependente do local em que o mesmo se insere.

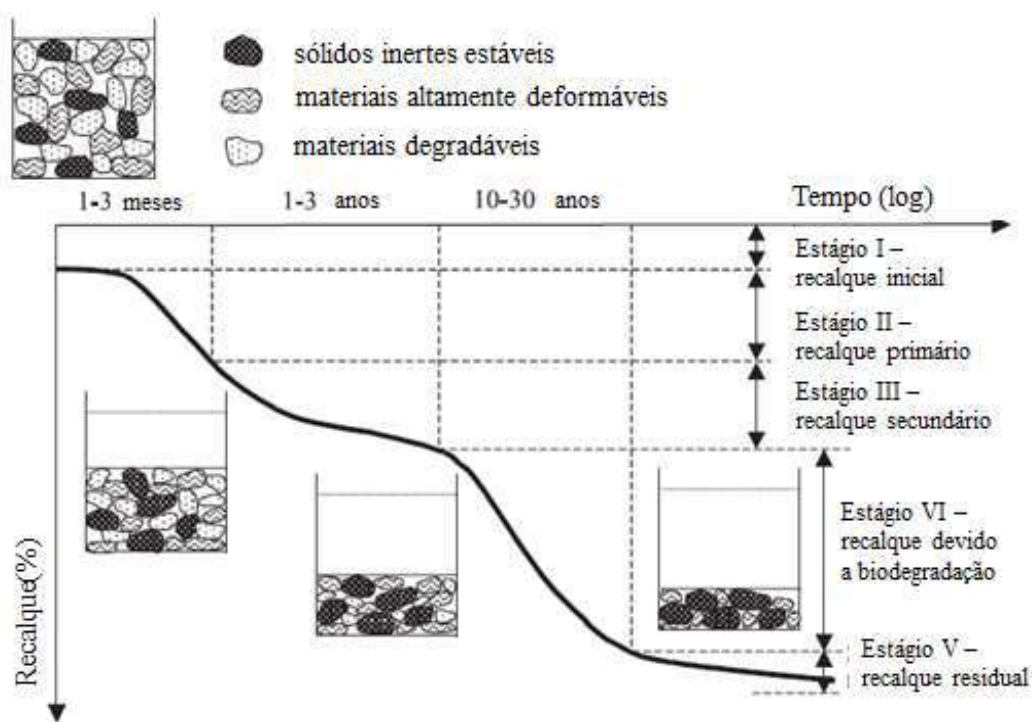
Conforme descrito por Frank e Tchobanoglous (2002), os recalques em aterros podem ter origem diversas, podendo ser gerados pela sobrecarga, devido ao peso próprio e/ou à perda de massa pelos processos de conversão da massa biodegradável em gases e lixiviado, como também devido à diminuição da poro-pressão pela percolação dos líquidos. Os autores ainda apontam que os recalques ocorridos em um aterro podem resultar em rupturas na camada de cobertura, quebras e desalinhamentos nas instalações de drenagem com consequências no uso futuro do aterro.

Em um aterro pode ocorrer três tipos de recalque, sendo eles: imediato ou inicial, primário e secundário. O recalque inicial é aquele derivado do acomodamento dos resíduos sob peso próprio, camadas sobrejacentes e máquinas de compactação

ocorrendo logo após o depósito dos resíduos. Já o recalque primário decorre do fenômeno de adensamento provocado pelo peso próprio dos resíduos que proporcionam a drenagem dos líquidos e gases gerados. Por fim, tem-se o recalque secundário que se origina no processo de degradação biológica do aterro e ocorre durante toda a sua vida (MELO et al., 2016).

A idade do aterro exerce grande impacto nos recalques e é possível observar que aterros antigos tem menor potencial deformação que os mais novos devido à diminuição da fração orgânica (JUCA e ALCANTARA, 2010). Com a finalidade de ilustrar o comportamento de recalque em um aterro no tempo, a figura 1 traz o fenômeno dividido em estágios de I a V da biodegradação, onde foi feita a estimativa de tempo e magnitude do fenômeno com base no trabalho e proposta de Grisolia e Napoleoni (1995).

Figura 1 – Curva tempo-recalque de um aterro baseado na proposta de Grisolia e Napoleoni (1995)



Fonte: Adaptado de Lie et al. (2006)

Segundo descrito por Xei, Xue e Gnanendran (2018), o estágio I corresponde à compressão instantânea e movimento dos materiais altamente deformáveis com a diminuição dos macro-poros. O estágio II trata da compressão contínua e ajuste de resíduos (compressão primária). O estágio III é a deformação secundária devido ao início da decomposição da fração orgânica e ao arraste. O estágio IV comporta a

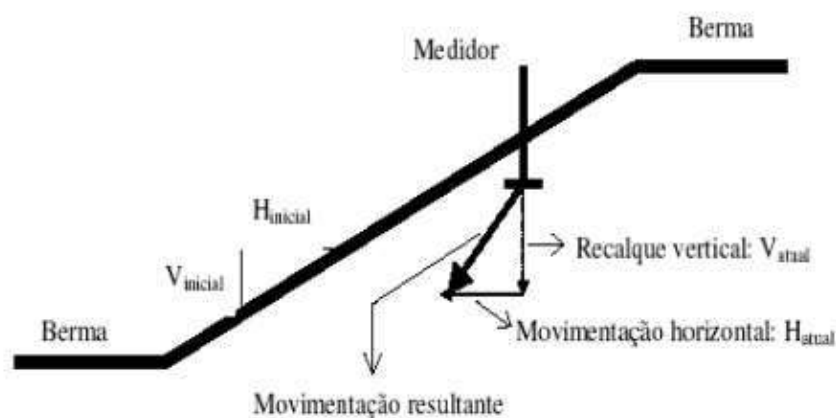
deformação devido à decomposição primária do material orgânico. Por fim, o estágio V (residual) são os últimos recalques mecânicos e biológicos.

Segundo Reddy, Kumar e Giri (2017) os recalques em resíduos sólidos urbanos podem variar entre percentuais de 15 a 50%. Essa magnitude reitera a importância do monitoramento, tendo em vista que esses recalques podem ocasionar danos na camada de cobertura, sistemas de acesso de drenagem, como também em rupturas e escorregamentos nos taludes.

No primeiro mês de depósito ocorre cerca de 10% do total de recalque. Essa taxa é crescente, sendo que nos primeiros 2 anos estima-se um total de 20% de diminuição na altura inicial dos resíduos, crescendo até que em 6 anos a estimativa seja de 60% do total de recalques. Depois de encerradas as atividades de depósito, são esperados movimentos na massa por até 25 anos devido à biodegradação, representando, assim, recalques na magnitude de 1 a 8% da altura inicial (XEI, XUE E GNANENDRAN, 2018).

Os recalques podem ser observados durante o monitoramento visual da camada de cobertura, pois esses geram trincas e fissuras superficiais. A quantificação dos movimentos é feita através de medições utilizando-se marcos superficiais, que são instalados na superfície do aterro, e equipamentos topográficos (estação total e prisma óptico). Esse processo de medição permite a observação de movimentações verticais e horizontais conforme ilustrado na figura 2 a seguir.

Figura 2 – Esquema de medições de movimentações superficiais



Fonte: Catapreta e Simões (2016)

Em consequência da contínua evolução dos recalques e aos possíveis problemas provenientes da continuidade da liberação de gases no aterro mesmo após o encerramento das atividades de depósito, em geral, não é aconselhada a construção imediata na área, sendo fundamental o monitoramento ambiental para comprovação da bioestabilização do local (FEAM, 2010).

### **2.3.1 Fatores Intervenientes no Recalque**

A velocidade e magnitude do processo de recalque em aterros sanitários são influenciadas por diversos fatores. Dentre esses fatores, Espinace *et al.* (1997), Alcantara e Juca (2010), Fei e Zekkos (2013), Melo *et al.* (2016) e Reddy, Kumar e Giri (2017) citam os seguintes como principais:

- Composição, característica e altura da camada de resíduos;
- Umidade do resíduo, sendo esta composta pela capacidade de campo e umidade de saturação da camada de cobertura;
- Operação do aterro sanitário, equipamentos usados na compactação, densidades atingidas pelo resíduo e material de cobertura;
- Tipo de material e espessura da camada de cobertura, condicionando a evolução da temperatura e umidade, entre outros fatores, tendo influência no processo anaeróbico de decomposição.
- Condições climáticas, pluviometria e temperatura, evaporação, transpiração e congelamento, influenciando na decomposição físico-química e biológico-química;
- Idade do aterro;

De certo que a composição de um resíduo afeta diretamente suas características de recalque, Jucá, Mariano e Melo (1999) ilustram o fato com a comparação de países com melhor IDH (caracterizados por um resíduo com teores de matéria orgânica próximos a 30%) e países de IDH inferior (com resíduos de teor de matéria orgânica próximo a 60%). O autor relata que os aterros dos países de maior IDH possuem menores recalques na comparação, atribuindo isso ao percentual orgânico.

Igualmente influencia a umidade, apesar de essencial para a decomposição, altos teores podem ter caráter inibitório, promovendo a circulação de oxigênio de forma a desfavorecer a decomposição anaeróbia, tendo em vista que a maior parte

da decomposição ocorre devido às bactérias metanotróficas que são anaeróbicas restritas (ALCANTARA e JUCÁ, 2010).

Melo et al. (2016) evidencia que a maior parte do recalque a longo prazo é realizada pela decomposição do RSU, sendo, portanto, os fatores internos e externos influentes no processo biodegradativo determinantes na velocidade do processo. A previsão e monitoramento dos recalques em aterros permitem o conhecimento desse parâmetro gerando dados que permitirão o melhor planejamento de projetos de estruturas de encerramento (drenagem, taludes, cobertura final), assim como dados pertinentes para o planejamento de usos futuros.

## 2.4 MONITORAMENTO DO BIOGÁS

O Brasil possui um aumento constante no percentual de emissão de gases do efeito estufa (GEE), segundo o relatório do Sistema de Estimativas de Emissões de Gases de Efeito Estufa (SEEG), referente ao ano de 2017 e realizado pelo Observatório do Clima. As emissões de GEE aumentaram de 1,86 bilhão de toneladas de gás carbônico equivalente  $\text{GtCO}_2\text{e}$  para 1,92  $\text{GtCO}_2\text{e}$ , ou seja, um aumento de 3,5%. Ainda segundo o relatório, os principais setores de produção de GEE são: agropecuária, energia, processos industriais, resíduos e mudanças de uso da terra.

Visando atender a crescente preocupação mundial no tocante às alterações climáticas, que são cientificamente associadas aos GEE, tem-se a importância do monitoramento das emissões e, como citado anteriormente, os resíduos são uma das fontes de geração. Apesar de esse setor ser responsável pela menor fração de produção quando comparado aos outros setores, é possível observar um aumento de 500% na cifra de gases produzidos no período de 1970 a 2015, em que variou de 12 para 64 Mt  $\text{CO}_2$  e (ALBUQUERQUE e COLUNA, 2018).

Primeiramente, o biogás de um aterro é produto das reações de metabolização da fração orgânica, sendo constituído por metano ( $\text{CH}_4$ ), dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) e em menor concentração, nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), oxigênio ( $\text{O}_2$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), hidrogênio ( $\text{H}_2$ ) e monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ) (CHU, 2016). Para ilustrar a composição típica dos gases emitidos no aterro, a Tabela 1 propõe faixas de composição do biogás em acordo com o trabalho

realizado por Nikiema (2007). Nesse trabalho, o autor relata sobre a influência da idade do resíduo e sua composição no volume e características do gás.

Tabela 1 – Faixas Típicas de Composição de Biogás

| <b>COMPONENTES</b>                           | <b>CONCENTRAÇÃO MÉDIA (%)</b> |
|----------------------------------------------|-------------------------------|
| <b>Metano (CH<sub>4</sub>)</b>               | 30 – 70                       |
| <b>Dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)</b>   | 20 – 50                       |
| <b>Nitrogênio (N<sub>2</sub>)</b>            | 1 – 5                         |
| <b>Oxigênio (O<sub>2</sub>)</b>              | 0,1 - 1,0                     |
| <b>Amônia (NH<sub>3</sub>)</b>               | 0,1 - 1,0                     |
| <b>Compostos sulfúricos (H<sub>2</sub>S)</b> | 0,0 - 0,2                     |
| <b>Hidrogênio (H<sub>2</sub>)</b>            | 0,0 - 0,2                     |
| <b>Monóxido de carbono (CO)</b>              | 0,0 - 0,2                     |
| <b>Outros gases-traço</b>                    | 0,01 - 0,06                   |

Fonte: Adaptado de Nikiema (2007)

De acordo com a agência ambiental dos Estados Unidos (EPA US, 2004), para um aterro maduro, o biogás gerado é predominantemente composto por metano e dióxido de carbono, com uma pequena quantidade de hidrogênio. Ainda nessa publicação, é atrelada a presença de oxigênio e nitrogênio ao ar que fica armazenado dentro do aterro. Sobre os gases traços, a revista cita que já foram detectados mais de 550 grupos químicos.

O controle da produção de gases em um aterro inicia-se com o começo das atividades do mesmo e deve perpetuar após seu encerramento. Durante a vida útil do aterro são realizadas obras de drenagem que objetivam encaminhar o biogás gerado para a queima em flares ou ainda o reaproveitamento energético. Após o encerramento das atividades, é instalada a camada de cobertura final que visa a diminuição das emissões via superfície, além da manutenção e controle das instalações de drenagem (CHU, 2016).

Segundo Lee, Han e Wang (2017), a drenagem dos gases pode ser realizada pela instalação de drenos verticais ou horizontais, sendo os horizontais comumente mais utilizados durante a operação, e os verticais, além de mais eficientes, são de maior uso após o encerramento.

O monitoramento ambiental dos gases pode ser feito de forma quantitativa e qualitativa, sendo atestado o fluxo volumétrico e sua composição respectivamente.

Esse monitoramento é realizado nos drenos e pela camada de cobertura (BORGES, VIMIEIRO E CATAPRETA , 2016).

Quadros, Aldibert e Fernandes (2018) retratam o processo de monitoramento do biogás, segundo os autores o monitoramento do fluxo pela camada de cobertura se utiliza de uma placa de fluxo que pode ser estática ou dinâmica e segue procedimento descrito por Maciel (2003). As medições de composição do biogás utilizam-se de equipamento detector de gases ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{H}_2\text{S}$ ) que faz o rastreamento qualitativo. Os ensaios para fluxo nos drenos são realizados *in situ* com o isolamento do dreno por manta de alta densidade seguido de medições com termo-anemômetro e detector de gases.

A manutenção e monitoramento dos drenos deve perdurar por até 30 anos pós encerramento das atividades, tendo em vista que esse será o período em que ocorreu a maior parte da dissipação de gases pelo local, ainda segundo Bagchi e Bhattacharya (2015) os gases são gerados por até 100 anos pós encerramento das atividades sendo esse o tempo de monitoramento segundo os autores.

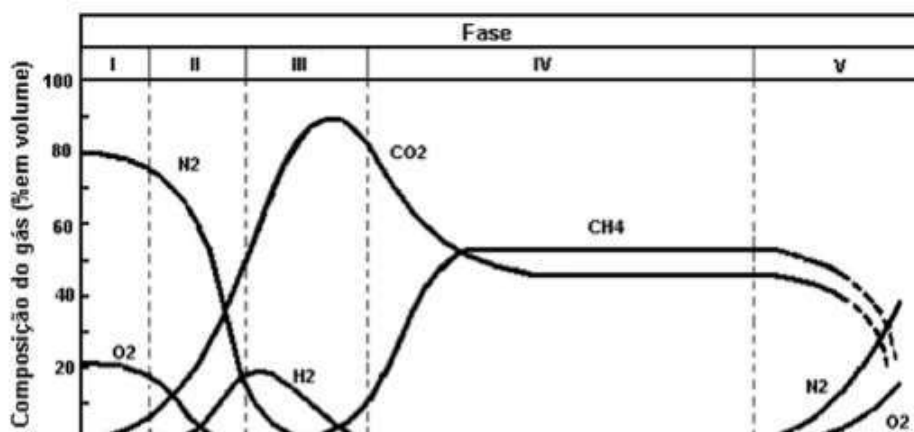
#### **2.4.1 Variações na Composição do Biogás**

A produção do biogás no aterro envolve processos biológico, físico e químicos complexos, sendo influenciada pela composição e densidade do resíduo, teor de umidade e distribuição, pH, disponibilidade de nutrientes, temperatura e presença de agentes tóxicos ou inibidores químicos (LEE, HAN e WANG , 2017).

Aterros com maior percentual de matéria orgânica produzem mais gás quando comparados a outro com menor percentual, sendo que climas mais quentes promovem um aumento da produção (ALCANTARA E JUCA, 2010). No Brasil, segundo o IPEA (2012) a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos corresponde a cerca de 51,4%, fato que em conjunto com o clima tropical propicia a alta produção de GEE.

Também é possível correlacionar as variações de volume e composição do biogás com as fases da decomposição, a figura 3 mostra a idealização do comportamento dos gases com o tempo e biodegradação segundo Farquhar e Rovers (1973 apud QUADROS, ALDIBERT e FERNANDES, 2018).

Figura 3 – Variação da composição dos gases do aterro com o tempo



Fonte: Quadros, Aldibert e Fernandes(2018)

Quadros, Aldibert e Fernandes(2018) relatam as variações da composição conforme as fases da decomposição, destacando que na fase um o oxigênio aprisionado nos resíduos é consumido principalmente por bactérias aeróbicas e, como resultado, tem-se o incremento de produção de dióxido de carbono, água e calor. Nessa fase, também é possível notar a liberação do nitrogênio aprisionado.

Por conseguinte, tem-se o estágio dois, no qual mediante a diminuição do oxigênio, começam as reações de hidrólise e acetogênese realizadas por bactérias hidrolíticas e acetogênicas respectivamente (incluindo espécies como *Clostridium* e *Bacillus*). Nessa etapa, ocorre a quebra de polímeros (como proteínas, lipídios e carboidratos) em moléculas menores, resultando na produção de ácido etanoico (ácido acético), etanoatos (acetatos) e etanol em conjunto com amônia, dióxido de carbono, água e calor.

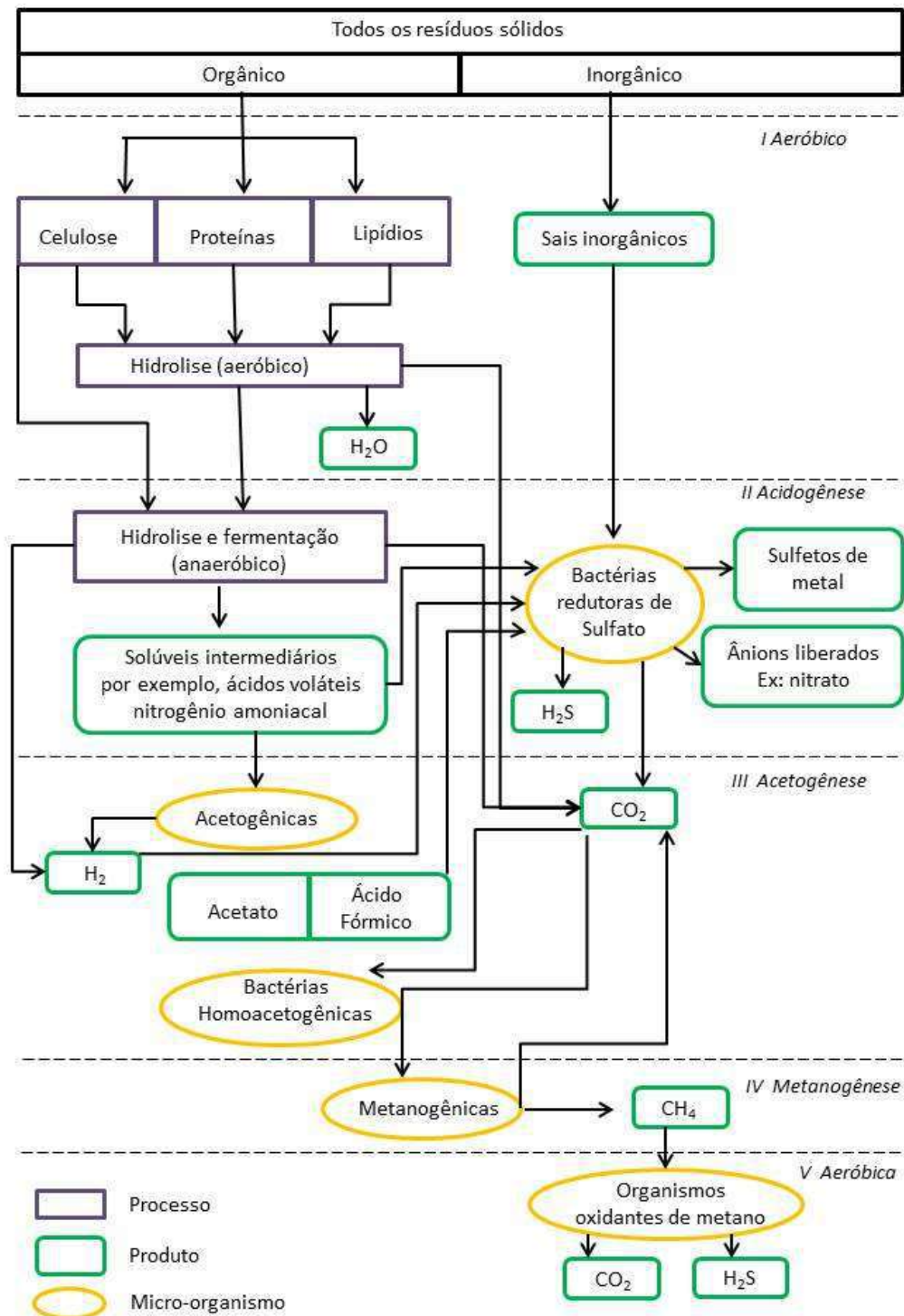
Em continuação, o estágio três é caracterizado pela transição entre o período aeróbico para o anaeróbico, onde continuam as reações de acetogênese e hidrólise e se inicia a metanogênese. As bactérias metanogênicas caracterizam-se por utilizar como substrato os produtos da fase dois (etanoato, hidrogênio e dióxido de carbono), produzindo, por conseguinte, os gases metano e dióxido de carbono.

Já no estágio quatro, ocorre um relativo equilíbrio entre as três reações mencionadas no parágrafo anterior. Segundo US EPA (2004), nessa etapa a produção de metano e dióxido de carbono ocorre numa taxa de 3:2.

Por fim, o estágio cinco é caracterizado pelo processo de finalização da decomposição. No referido estágio, a diminuição da fração orgânica limita a ação da microbiota, diminuindo assim, o volume de gás produzido. Tendo em vista facilitar a

visualização das etapas de decomposição, a figura 4 abaixo retrata o processo de forma esquematizada.

Figura 4 – Reações de decomposição e produção de gases em um aterro



Fonte: Adaptado de US EPA (2004)

É importante destacar que a decomposição dividida em etapas é uma idealização teórica, podendo haver sobreposição de etapas, omissão de fase e até cessação temporária do processo em campo. O tempo total e para cada etapa também varia de acordo com o aterro e as características do entorno.

## 2.5 MONITORAMENTO DE LÍQUIDOS E LIXIVIADOS

O lixiviado é uma mistura líquida resultante da decomposição da fração orgânica em conjunto com líquido percolado pelo montante de resíduo do aterro. Esse líquido tem alto caráter poluente devido aos elevados índices de carga orgânica (DBO) e inorgânicas (DQO). A geração de chorume depende de vários fatores, sendo os de maior influência: tipo de solo, composição de resíduos, grau de compactação, volume de resíduos, evapotranspiração como também da operação e idade de aterro (FAUZIAH, 2013).

Monteiro (2003) relata que o volume de lixiviado produzido depende principalmente da quantidade de água percolada no aterro. Por conseguinte, cabe enumerar as possíveis fontes de água, sendo elas: precipitação, irrigação, infiltração subterrânea, recirculação no aterro, água nos resíduos e água proveniente dos processos de decomposição. A autora ainda ressalta que no transcorrer do tempo, a água contida nos resíduos e provenientes da decomposição possui uma diminuição de influência e a água egressa dos meios externos tem maior participação.

O monitoramento do lixiviado é de suma importância devido ao seu potencial poluidor. O sistema de drenagem do aterro deve encaminhar os líquidos para local de tratamento e destinação final. No percurso deve ser avaliado diariamente o volume produzido e, com frequência mensal ou trimestral, devem ser retiradas amostras para análise e acompanhamento de parâmetros físico, químico e biológico (BORGES, VIMIEIRO e CATAPRETA, 2016).

### 2.5.1 Variações na composição do lixiviado

A composição do lixiviado é variável com a sazonalidade ocorrida antes da amostragem, além de variar com a idade do aterro (NAVEENI, SIVAPULLAIAH e SITHARAMIII, 2016). Vários autores propuseram faixas para parâmetros mais

analisados tendo em vista revisões bibliográficas ou o monitoramento contínuo de aterros.

Frank e Tchobanoglous (2002), Lee, Han e Wang (2010), Fuziah et al. (2013), Bhalla, Saini e Jha (2013), Naveeni, Sivapullaiah e Sitharamiii (2016), Zhang e Surampalli (2016) realizaram pesquisas que correlacionaram faixas de valores para parâmetros de lixiviado com o tempo, sendo os resultados apresentados nas tabelas abaixo.

Tabela 2 – Composição Típica de Lixiviado por Frank e Tchobanoglous

| Parâmetro                                 | Resíduos Recentes (<2anos) |        | Resíduos antigos (>10anos) |
|-------------------------------------------|----------------------------|--------|----------------------------|
|                                           | Faixa                      | Típico |                            |
| <b>DBO</b>                                | 2.000–30.000               | 10000  | 100–200                    |
| <b>DQO</b>                                | 1.500–20.000               | 6000   | 80–160                     |
| <b>COT</b>                                | 3.000–60.000               | 18000  | 100–500                    |
| <b>Sólidos em suspensão total</b>         | 200–2.000                  | 500    | 100–400                    |
| <b>Nitrogênio orgânico</b>                | 10–800                     | 200    | 80–120                     |
| <b>Nitrogênio amoniacal</b>               | 10–800                     | 200    | 20–40                      |
| <b>Nitrato</b>                            | 5–40                       | 25     | 5–10                       |
| <b>Fósforo total</b>                      | 5–100                      | 30     | 5–10                       |
| <b>Alcalinidade como CaCO<sub>3</sub></b> | 1.000–10.000               | 3000   | 200–1000                   |
| <b>pH</b>                                 | 4.5–7.5                    | 6      | 6.6–7.5                    |
| <b>Cálcio</b>                             | 200–3.000                  | 1000   | 100–400                    |
| <b>Magnésio</b>                           | 50–1.500                   | 250    | 50–200                     |
| <b>Potássio</b>                           | 200–1.000                  | 300    | 50–400                     |
| <b>Sódio</b>                              | 200–2.500                  | 500    | 100–200                    |
| <b>Cloro</b>                              | 200–3.000                  | 500    | 100–400                    |
| <b>Sulfato</b>                            | 50–1.000                   | 300    | 20–50                      |
| <b>Ferro total</b>                        | 50–1200                    | 60     | 20–200                     |

Fonte: Adaptado de Frank e Tchobanoglous (2002)

Segundo Frank e Tchobanoglous (2002) lixiviados de aterros antigos possuem uma considerável diminuição da DBO, DQO e alcalinidade. Ainda pode ser observado que o pH possui uma pequena elevação tendo valores em torno de 7 com o passar do tempo. O nitrato não possui considerável variação com o passar do tempo. Tais fatores podem ser visto nas faixas de valores de outros autores como de Lee, Han e Wang (2010)

Tabela 3 – Composição Típica de Lixiviado por Lee *et al*

| Parâmetro                   | Aterro Jovem   |        | Aterro Maduro  |        |
|-----------------------------|----------------|--------|----------------|--------|
|                             | Faixa          | Média  | Faixa          | Média  |
| DBO5 (mg/l)                 | 13.10-6350,00  | 203,62 | 61,90-870,00   | 195,83 |
| DQO (mg/l)                  | 226,00-9600,00 | 3641,2 | 409,00-1510,00 | 875,44 |
| DBO/DQO                     | 0,05-0,66      | 0,31   | 0,05-0,57      | 0,2    |
| pH                          | 5,92-6,80      | 6,52   | 6,27-7,38      | 5,72   |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/l) | 103,00-520,00  | 288,6  | 78,50-523,00   | 260,03 |
| Nitrito (mg/l)              | 1,00-2,00      | 1,8    | 0,10-2,00      | 0,72   |
| Nitrato (mg/l)              | 1,00-2,00      | 1,8    | 0,10-2,00      | 0,73   |
| Ferro (mg/l)                | 3,84-73,80     | 32,11  | 2,91-32,5      | 11,24  |
| Magnesium (mg/l)            | 118,00-179,00  | 153,6  | 75,70-215,00   | 132,79 |
| Sodium (mg/l)               | 279,00-1370,00 | 764,2  | 297,00-1030,00 | 688    |
| Sulfato (mg/l)              | 40,00-509,00   | 196,8  | 7,03-771,00    | 81,73  |
| Fenol (mg/l)                | 3,00-1720,00   | 783,8  | 1,00-951,00    | 175,44 |

Fonte: Adaptado de Lee, Han e Wang (2010)

No trabalho de Lee, Han e Wang (2010) são encontradas faixas menores de Ph para aterros antigos o que pode ser correlacionado com características do resíduos e local de depósito. Os autores catalogaram faixas de nitrito e nitrato que apresentam uma menor influencia do tempo na concentração quando comparados as diminuições visíveis na DBO, DQO e relação DBO/DQO.

Tabela 4 – Composição Típica de Lixiviado por Fuziah *et al*

| Parâmetro                   | Aterro Sanitário Ativo | Aterro Sanitário Encerrado |
|-----------------------------|------------------------|----------------------------|
| DBO5 (mg/l)                 | 12.000,00              | 3.500,00                   |
| DQO (mg/l)                  | 24.800,00              | 10.230,00                  |
| pH                          | 7,35                   | 8,20                       |
| TSS (mg/l)                  | 688,00                 | 97,00                      |
| Cd (ppm)                    | ND                     | <0,001                     |
| Cu (ppm)                    | ND                     | <0,001                     |
| Pb (ppm)                    | ND                     | 0,001                      |
| Zn (ppm)                    | 0,21                   | 0,10                       |
| Mn (ppm)                    | 540,00                 | 0,12                       |
| K (ppm)                     | 530,00                 | 440,00                     |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/l) | 0,085                  | 880                        |
| Hg (ppm)                    | 0,05                   | 0,12                       |
| Fe (ppm)                    | 8,52                   | 3,10                       |

Fonte: Adaptado de Fuziah *et al.* (2013)

Tabela 5 – Composição Típica de Lixiviado por Bhalla, Saini e Jha

| Parâmetro             | Novo                            | Intermediário                         | Antigo                    |
|-----------------------|---------------------------------|---------------------------------------|---------------------------|
| Idade (anos)          | < 5                             | 5-10                                  | >10                       |
| pH                    | 6,5                             | 6,5-7,5                               | >7,5                      |
| DBO5(mg/l)            | 10000-2000                      |                                       | 50-100                    |
| DQO (mg/l)            | > 10000                         | 4000-10000                            | <4000                     |
| DBO5/DQO              | > 0,3                           | 0,1-0,3                               | <0,1                      |
| Componentes Orgânicos | 80% ácidos graxos voláteis(AGV) | 5-30% AGV + ácidos húmicos e fulvicos | Ácidos húmicos e fúlvicos |
| AGV (mg/l)            | 9000-25000                      |                                       | 50-100                    |
| Metais pesados        | Baixo-médio                     | Baixo                                 | Baixo                     |
| Biodegradabilidade    | Importante                      | Média                                 | Baixo                     |

Fonte: Adaptado de Bhalla, Saini e Jha (2013)

Observa-se que todos os autores constatarem a diminuição da biodegradabilidade com o tempo, tanto quando comparadas as faixas de demanda bioquímica e química quanto quando observadas a acentuada queda na relação DBO/DQO. As concentrações de metais pesados observadas possuem considerada estabilidade com o tempo não sendo esse, portanto, um fator passível de influência.

Tabela 6 – Composição Típica de Lixiviado por Naveen et al.

| Parâmetros            | Aterro Antigo | Aterro Novo       |
|-----------------------|---------------|-------------------|
| pH                    | 7.38          | 5.7               |
| Coloração             | Marrom        | Escuro            |
| Odor                  | Intenso       | Menor intensidade |
| Condutividade (µS/cm) | 2750          | 1050              |
| Turbidez (NTU)        | 470           | 80                |
| DBO (mg/l)            | 40            | 1680              |
| DQO (mg/l)            | 498           | 4960              |
| Sulfato (mg/l)        | 42            | 30                |
| Alcalinidade (mg/l)   | Nil-          | 2500              |
| Ferro (mg/l)          | 5.28          | 6.61              |
| Nitrato (mg/l)        | 82.73         | 8.91              |

Fonte: Adaptado de Naveeni, Sivapullaiah e Sitharamiii (2016)

Durante a passagem temporal, ocorre o processo de biodegradação do aterro, responsável pelas alterações que ocorrem e seus parâmetros físicos,

químicos e biológicos. Segundo Pohland e Harper (1986), é possível dividir o processo de bioestabilização do material orgânico dos aterros em cinco fases.

A fase I é denominada de aeróbia, na qual ocorre a decomposição aeróbica devido à presença de oxigênio retido na massa de resíduos. A fase II tem nome de transição, pois conforme o oxigênio é consumido nos processos aeróbicos, propicia-se a formação de um meio anaeróbio. A fase III, também denominada fase ácida, possui esse nome devido à formação de ácidos orgânicos nessa etapa do processo de decomposição. Já a fase IV, denominada fermentação metanogênica, é aquela na qual ocorre a predominância da liberação dos gases metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Por fim, a fase V ou maturação final é reconhecida por sua relativa inatividade, ocorrendo a estabilização da atividade biológica com consequente paralização da produção de gases.

Os autores Pohland e Harper (1986), Kjedsen *et al.* (2002) e Sousa (2009) realizaram a correlação de faixa de valores encontrados nos parâmetros do lixiviado com as fases de decomposição do resíduo acima citadas. Vale salientar que o trabalho de Sousa (2009) foi realizado com 40 aterros brasileiros. Todos os resultados podem ser observados nas tabelas 7, 8 e 9 abaixo.

Tabela 7 – Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Pohland e Harper

| Parâmetros (mg/L)                                            | Fase 2        | Fase 3         | Fase 4        | Fase 5        |
|--------------------------------------------------------------|---------------|----------------|---------------|---------------|
| <b>pH (adimensional)</b>                                     | 6,7           | 47, a 7,7      | 6,3 a 8,8     | 7,1 a 8,8     |
| <b>Alcalinidade</b>                                          | 140 a 9.650   | 760 a 5.050    | 200 a 3.520   | 140 a 9.650   |
| <b>Condutividade (<math>\mu\text{S}/\text{cm}</math>)(*)</b> | 1,6 a 17,1    | 2,9 a 7,1      | 1,4 a 4,5     | 1,4 a 17,1    |
| <b>ST</b>                                                    | 2.050 a 2.450 | 4.120 a 55.300 | 2.090 a 6.410 | 1.460 a 4.640 |
| <b>DBO</b>                                                   | 100 a 10.900  | 1.000 a 57.700 | 600 a 3.400   | 4 a 120       |
| <b>DQO</b>                                                   | 480 a 18.000  | 1.500 a 71.100 | 580 a 9.760   | 31 a 900      |
| <b>AVT (mgHAc/L)(*)</b>                                      | 100 a 3.000   | 3.000 a 18.800 | 250 a 4.000   | ausente       |
| <b>Cobre</b>                                                 | 0,085 a 0,39  | 0,005 a 2,2    | 0,03 a 0,18   | 0,02 a 0,56   |
| <b>Ferro</b>                                                 | 68 a 312      | 90 a 2.200     | 115 a 336     | 4 a 20        |
| <b>Chumbo</b>                                                | 0,001 a 0,004 | 0,01 a 1,44    | 0,01 a 0,10   | 0,01 a 0,10   |
| <b>Magnésio</b>                                              | 66 a 96       | 3 a 1.140      | 81 a 505      | 81 a 190      |
| <b>Manganês</b>                                              | 0,6           | 0,6 a 41       | 0,6           | 0,6           |
| <b>Níquel</b>                                                | 0,02 a 1,55   | 0,03 a 79      | 0,01 a 1      | 0,07          |
| <b>Potássio</b>                                              | 35 a 2.300    | 35 a 2.300     | 35 a 2.500    | 35 a 2.500    |

|                                          |              |            |            |            |
|------------------------------------------|--------------|------------|------------|------------|
| <b>Sódio</b>                             | 20 a 7.600   | -          | -          | -          |
| <b>Zinco</b>                             | 0,06 a 21    | 0,65 a 220 | 0,40 a 6   | 0,4        |
| <b>Cádmio</b>                            | 190 a 490    | 70 a 3.900 | 76 a 490   | 76 a 254   |
| <b>Cromo</b>                             | 0,023 a 0,28 | 0,06 a 18  | 0,05       | 0,05       |
| <b>Cloreto</b>                           | 30 a 5.000   | 30 a 5.000 | 30 a 5.000 | 30 a 5.000 |
| <b>Sulfeto</b>                           | Ausente      | 0 a 818    | 0,9        | ausente    |
| <b>Coliformes Totais (NNP/100ml) (*)</b> | 100 a 105    | 100 a 105  | Ausente    | ausente    |
| <b>Coliformes Fecais (NNP/100ml) (*)</b> | 100 a 105    | 100 a 105  | Ausente    | ausente    |

Fonte: Adaptado de Pohland e Harper (1986)

Tabela 8 – Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Kjedsenetall

| Parâmetro                   | Fase Ácida |            | Fase Metanogênica |          | Média |
|-----------------------------|------------|------------|-------------------|----------|-------|
|                             | Média      | Faixa      | Média             | Faixa    |       |
| <b>pH</b>                   | 6,1        | 4,5-7,5    | 8                 | 7,5-9    |       |
| <b>DBO</b>                  | 13000      | 4000-40000 | 180               | 20-550   |       |
| <b>DQO</b>                  | 22000      | 6000-60000 | 3000              | 500-4500 |       |
| <b>DBO/DQO</b>              | 0,58       |            | 0,06              |          |       |
| <b>Sulfato</b>              | 500        | 70-1750    | 80                | 10-420   |       |
| <b>Nitrogênio Amoniacal</b> |            |            |                   |          | 740   |
| <b>Ferro Total</b>          | 780        | 20-2100    | 15                | 3-280    |       |

Fonte: Adaptado de Kjedsenetall (2002)

Tabela 9 – Parâmetros do Lixiviado X Decomposição por Sousa

| Variável                                            | Faixa de Valores |                   |
|-----------------------------------------------------|------------------|-------------------|
|                                                     | Fase ácida       | Fase metanogênica |
| <b>pH</b>                                           | 4,4 - 8,4        | 5,9 - 9,2         |
| <b>Alcalinidade total(mg/L de CaCO<sub>3</sub>)</b> | 170 - 32.000     | 125 - 20.200      |
| <b>Turbidez (UNT)</b>                               | 100-540          | 0,02 - 620        |
| <b>Condutividade (µS/cm)</b>                        | 230 - 45.000     | 100 - 45.000      |
| <b>DBO (mg/L de O<sub>2</sub>)</b>                  | 1 - 55.000       | 3 - 17.200        |
| <b>DQO (mg/L de O<sub>2</sub>)</b>                  | 90 - 100.000     | 20 - 35.000       |
| <b>NTK (mg/L de N)</b>                              | 1,7 - 3.000      | 0,6 - 5.000       |
| <b>NAT (mg/L de N)</b>                              | 0,07 - 2.000     | 0,03 - 3.000      |
| <b>N-NO<sub>2</sub>(mg/L de N)</b>                  | Nd               | nd - 70           |
| <b>N-NO<sub>3</sub>(mg/L de N)</b>                  | nd - 45          | nd - 270          |

|                            |                           |                          |
|----------------------------|---------------------------|--------------------------|
| <b>P-total (mg/L de P)</b> | nd - 260                  | nd - 80                  |
| <b>Cloreto (mg/L)</b>      | 275 - 4.700               | 20 - 6.900               |
| <b>ST (mg/L)</b>           | 400- 45.000               | 200 - 29.000             |
| <b>STV (mg/L)</b>          | 78 - 26.700               | 75 - 20.000              |
| <b>STF (mg/L)</b>          | 40 - 28.400               | 100 - 17.000             |
| <b>SST (mg/L)</b>          | 10 - 7.000                | 7 - 12.400               |
| <b>Fe total (mg/L)</b>     | nd -1.400                 | 0,01 - 720               |
| <b>Cd total (mg/L)</b>     | nd - 0,1                  | nd - 0,6                 |
| <b>Cu (mg/L)</b>           | nd- 0,8                   | nd - 2,9                 |
| <b>Cr (mg/L)</b>           | nd - 1,2                  | nd - 1,0                 |
| <b>Mn total (mg/L)</b>     | nd - 115                  | nd - 30                  |
| <b>Ni (mg/L)</b>           | nd - 6,5                  | nd - 1,4                 |
| <b>Zn (mg/L)</b>           | nd - 27                   | nd - 35                  |
| <b>Pb total (mg/L)</b>     | nd - 1,5                  | nd - 6,7                 |
| <b>CT (NMP/100 mL)</b>     | 200 - 5 x 10 <sup>7</sup> | nd - 2 x 10 <sup>8</sup> |

Fonte: Adaptado de Sousa (2009)

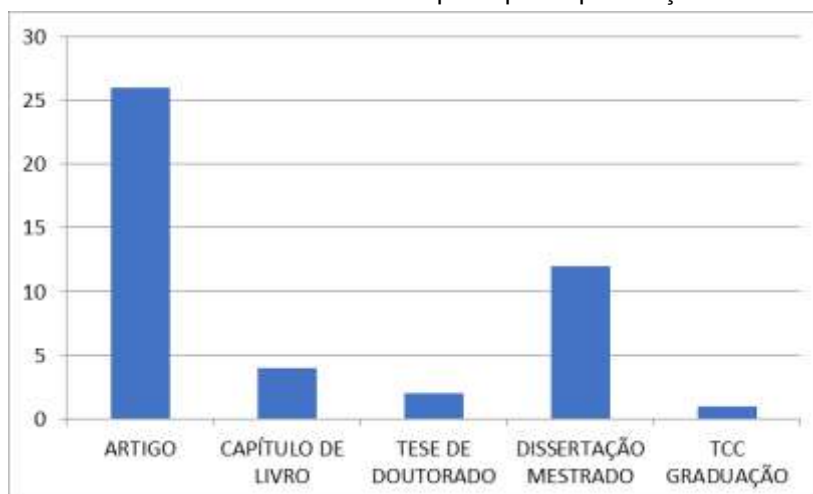
Por fim, tem-se que a variação dos parâmetros do lixiviado com o tempo e fases da decomposição retrata um problema no processo de tratamento, tendo em vista que o procedimento aplicado para tratar o líquido proveniente de um aterro novo pode não ser adequado para o tratamento do produzido por um aterro antigo. Segundo Jucá (2003), o líquido egresso do aterro não deve ser tratado com uma única solução, sendo aconselhado pelo autor, processos anaeróbios e aeróbios.

## 2.6 PESQUISAS SOBRE O TEMA NO BRASIL

Esse tópico tem por objetivo analisar as produções científicas nacionais sobre o monitoramento ambiental de aterros encerrados. Para tanto, foi realizada uma pesquisa on-line nos Catálogo de Teses e Dissertações da Capes, Periódicos Capes, Scientific Electronic Library Online e Google Acadêmico, considerando-se as publicações entre 2010 a 2019.

A princípio, foram encontradas 45 produções dentre artigos publicados em revista e congressos, trabalhos de conclusão de curso (graduação), dissertações (mestrado), teses (doutorado) e capítulos de livros, conforme abaixo.

Gráfico 1 – Estado da Arte por Tipo de publicação

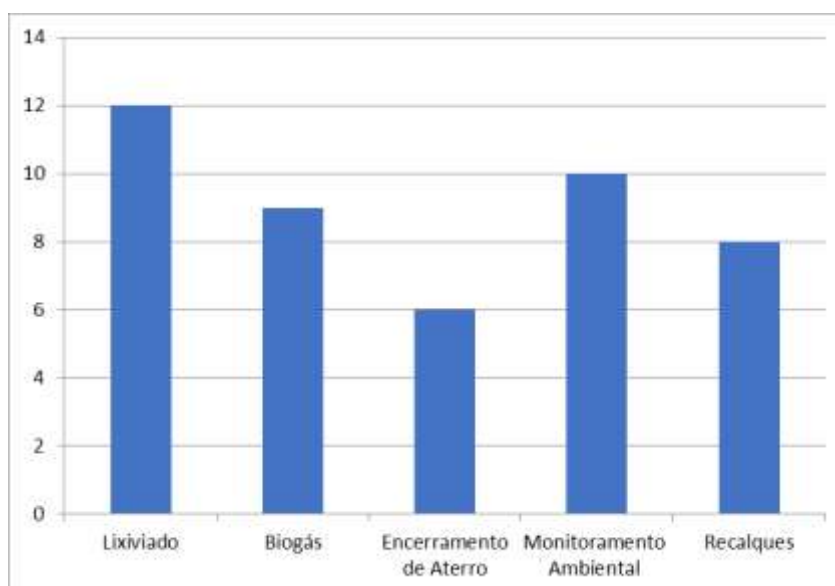


Fonte: A autora (2019).

Esses resultados foram obtidos por meio da combinação dos descritores: “monitoramento de aterro encerrado”, “lixiviado aterro encerrado”, “biogás aterro encerrado”, “recalque aterro encerrado”, “aftercare of closed landfills”, “environmental monitoring closed landfills”, “environmental monitoring old landfills” e “long term environmental monitoring”.

Dentre todas as pesquisas, não foram encontrados resultados que abrangessem dados quantitativos do monitoramento geomecânico, do lixiviado e biogás de aterro encerrado. Entretanto esses monitoramentos foram observados por autores de forma isolada, havendo a possibilidade de classificação em tema para os resultados como mostrado a seguir.

Gráfico 2 – Divisão do Estado da Arte por tema



Fonte: A autora (2019).

Dentre as pesquisas selecionadas todas abrangeram o estudo de aterros encerrados sendo elas exposições teóricas e quantitativas, das 45 publicações 33 trouxeram dados quantitativos de monitoramento dos parâmetros, sendo 73,33% dos resultados. A base de dados utilizada no estado de arte aqui exposto pode ser observada no APÊNDICE A.

Em todos os resultados selecionados foi ressaltada a importância do estudo dos passivos gerados por aterros no período pós encerramento. Em contraposto, nota-se que a quantificação desse passivo por longo período é escassa, estando nessa problemática o destaque desse trabalho ao demonstrar ampla investigação ambiental em longo período de um aterro brasileiro encerrado.

## 2.7 USOS FUTUROS PARA LOCAIS DE ATERROS ENCERRADOS

Segundo a FEAM (2010), a escolha do uso futuro para o local onde antes havia um aterro deve levar em conta que os processos de biodegradação continuam por períodos que podem durar mais de 10 anos, sendo necessária a manutenção das estruturas, drenagem e tratamento para líquidos e gases gerados durante período definido por órgão ambiental em acordo com as características de cada local. Ainda ressalta-se que a escolha deve levar em conta a preservação da saúde humana e ao meio ambiente, sendo necessário um estudo do local e das aptidões do mesmo.

Após a reabilitação e comprovação da estabilização da massa de resíduos, Chu (2016) cita algumas soluções para uso futuro, tais como: parques, reservas ecológicas, estacionamentos ou locais para instalação de indústrias. Entretanto, tendo em vista a pouca capacidade de carga e possibilidade de conter gás explosivo (metano), não é aconselhável a implantação de edificações, a não ser que haja autorização de órgão ambiental mediante amplo estudo geotécnico e monitoramento dos gases (FEAM, 2010).

Por mais que haja conhecimento sobre as cautelas a serem tomadas no caso de construções em locais de antigos aterros, no Brasil são constantes as notícias de incidentes ocasionados pela imprudência ou desconhecimento. A tabela 10 traz casos em que foram identificados problemas derivados de construções em áreas de antigas jazidas de RSU.

Tabela 10 – Construções sob antigos depósitos no Brasil

| <b>Cidade</b>                        | <b>Tipo de Empreendimento / Local</b> | <b>Ano</b> | <b>Origem da Contaminação</b> |
|--------------------------------------|---------------------------------------|------------|-------------------------------|
| <b>Colmeia – TO</b>                  | Casas Populares                       | 2013       | Lixão                         |
| <b>Juiz de Fora – MG</b>             | Bairro Cidade do Sol                  | 2012       | Lixão                         |
| <b>Nossa Senhora do Socorro – SE</b> | Loteamento particular                 | 2011       | Lixão                         |
| <b>Fortaleza – CE</b>                | Bairro Monte Castelo                  | 2011       | Lixão                         |
| <b>São Paulo – SP</b>                | Shopping Center Norte                 | 2011       | Lixão                         |
| <b>Manaus – AM</b>                   | Parque Público                        | 2011       | Lixão                         |
| <b>Mauá – SP</b>                     | Condomínio Mauá                       | 2011       | Lixão Industrial              |
| <b>São Luís – MA</b>                 | Shopping São Luiz                     | 2011       | Lixão do Jacarati             |
| <b>Valparaíso – GO</b>               | Conjunto Habitacional                 | 2010       | Lixão de Valparaíso           |
| <b>Niterói – RJ</b>                  | Morro do Bumba                        | 2010       | Lixão                         |
| <b>Goiânia – GO</b>                  | Residências em bairros adjacentes     | 2010       | Lixão                         |

Fonte: Bezerra (2015)

Além de apresentar um risco de contaminação por substâncias tóxicas locais de antigos depósitos apresentam características geotécnicas diferenciadas devido a grande variedade de materiais ali contido e considerável percentual orgânico. O local ainda é passivo a recalques diferenciais ao longo do terreno e as construções estarão em meio agressivo e mais suscetível a carbonatação e corrosões.

Bezerra (2015) estudou o bairro de Nova Descoberta na cidade de Recife, Pernambuco. No local, moradias populares foram construídas após aterramento de um depósito irregular de resíduos, a autora detectou resíduos em estágio de decomposição e a presença de biogás no subsolo, indicando a área para análise de riscos antes do futuro uso.

Em suma, a escolha do uso futuro das áreas de depósito encerradas deve ser criteriosa, havendo uma necessidade que a requalificação atenda as necessidades da comunidade local. Ressalta-se ainda a importância do monitoramento ambiental no processo, com vistas a atestar a aptidão da área para o fim desejado.

### 3 METODOLOGIA

Esse tópico trata dos procedimentos de tratamento de dados para obtenção de análise mostrada nos resultados.

Os resultados de recalque são demonstrados através de gráficos que correlacionam o recalque acumulado com o tempo. Também é possível calcular a velocidade de recalque sendo este resultado da divisão do recalque pelo tempo esse parâmetro é demonstrado em gráficos velocidade pelo tempo. Por fim uma importante relação é a deformação específica que consiste na relação entre a altura inicial dos resíduos e o recalque total. Essa análise de dados foi a mesma utilizada pelos autores Mariano (1999), Melo (2003), Monteiro (2003), Denardin (2013), Eyay (2016) e Corrêa, Elk e Ritter (2017).

Os dados provenientes do monitoramento do biogás (drenos) e lixiviado foram analisados utilizando-se estatística descritiva com a avaliação das faixas de valores (mínimo e máximo), média, desvio padrão e coeficiente de variação. Nesses também foi aplicada a decomposição clássica para dados temporais, tendo em vista a melhor compreensão da tendência temporal dos parâmetros.

Conforme Reis e Lino (2019) a decomposição clássica tem por finalidade o melhor entendimento de grandezas ao longo do tempo, de modo a servir de ferramenta auxiliar na previsão para uma grandeza. Seguindo esse preceito propõe-se que o comportamento de um parâmetro ao longo do tempo resulta da interferência de diversos componentes. A decomposição clássica considera que as variações temporais acontecem em função de efeitos sazonais, cíclicos, de tendência e componentes aleatórios.

Ainda segundo os autores a sazonalidade (S) retrata variações em função das estações do ano sendo, portanto, um comportamento cíclico. A tendência (T) apresenta o comportamento em relação ao tempo, podendo esse ser crescente, decrescente ou estável. O ciclo (C) explica o comportamento irregular das grandezas em forma de flutuações semelhantes a ondas em torno das tendências, que têm duração maior do que um ano, entretanto não possuem a periodicidade que característica do padrão sazonal. Os componentes aleatórios (A) são as variantes residuais, quando excluimos os efeitos sazonais, cíclicos e de tendência de uma série que revele o comportamento de uma grandeza ao longo do tempo.

Sendo assim, a série temporal pode ser enxergada da seguinte forma:

$$R = S \times T \times C \times A \quad (III)$$

Onde:

**R** é o valor real da grandeza e os fatores são os efeitos supramencionados.

A aplicação do método ocorreu conforme metodologia proposta por Bouzada (2012). Primeiro foi realizada a aplicação da média móvel anual aos dados permitindo a suavização das variações. As médias móveis são então transformadas em médias centradas plotadas de modo a possibilitar a observação da tendência livre da sazonalidade, componentes cíclicos e também de parte dos componentes aleatórios.

A determinação da tendência foi feita a partir da opção (do Excel) de adicionar uma linha de tendência à série da média móvel centrada, sendo a quantificação desses valores realizada por uma reta de regressão linear onde o parâmetro é retornado como (y) e o valor do tempo encontra-se como (x) em dias, sendo considerado 0 a primeira data de medição.

O ajuste da reta aos valores de média centrada foi verificado através do cálculo de  $R^2$  que demonstra o teste de aderência, quanto mais próximo de 1 melhor a aderência. Para esta pesquisa, valores de R acima de 70% foram considerados de boa aderência nesse estudo segundo Reis e Lino (2019) trata-se de um valor admissível para o teste.

### 3.1 LOCAL DE ESTUDO: HISTÓRICO DO ATERRO

O Aterro Controlado da Muribeca já foi considerado o maior aterro em operação do estado do Pernambuco. Situado na região metropolitana de Recife, mais especificamente na cidade de Jaboatão do Guararapes, distando cerca de 16 km do centro da capital pernambucana. Compreende um perímetro de 3.848m, resultando em uma área de 60 hectares, estando às margens dos rios Muribequinha e Jaboatão.

O local funciona como depósito de resíduos desde 1985, chegando a receber 3200 toneladas/dia de resíduos domésticos, hospitalares e industriais, ao atender aos municípios de Recife e Jaboatão dos Guararapes (LINS, 2011). As figuras 5 e 6 abaixo mostram a localização e a vista aérea do referido aterro.

Figura 5 – Localização em mapa do aterro da Muribeca



Fonte: Adaptado Google Maps (2018)

Figura 6 – Vista aérea do Aterro Controlado da Muribeca/PE, ano 2009



Fonte: GRS (2018)

De acordo com Jucá, Mariano e Melo (1999), no ano de 1994, foi realizado um diagnóstico para o conhecimento das características físicas da área (geologia, hidrogeologia, geotecnia, morfologia, recursos hídricos e meteorologia), tendo como

finalidade o estudo da contaminação da área, bem como a elaboração de projetos com a melhor alternativa tecnológica para a recuperação da área.

Em seguida, descobriu-se que o aterro está localizado sob o embasamento cristalino, ocorrendo, portanto, o fluxo de contaminantes de forma superficial, ou seja, não existindo infiltrações para em lençóis profundos (JUCA, MARIANO E MELO, 1999).

A conversão do lixão em aterro controlado consistiu na geometrização do montante de resíduos com a construção de nove células com dimensões aproximadas de 200x200m (largura x comprimento) e altura variando de 20 a 40m (LINS *et al.*, 2011).

A tabela 11 retrata as características de idade aproximada de encerramento, área e volume de cada local.

Tabela 11 – Caracterização das células do aterro da Muribeca/PE

| CÉLULA | PERÍODO DE ENCERRAMENTO | ÁREA (ha) | COTA MÁXIMA (m) | VOLUME (m <sup>3</sup> ) |
|--------|-------------------------|-----------|-----------------|--------------------------|
| 1      | 2003-2004               | 4         | 45              | 1,8 x 10 <sup>6</sup>    |
| 2      | 2007-2008               | 4,2       | 55              | 2,3 x 10 <sup>6</sup>    |
| 3      | 2009                    | 4,62      | 55              | 2,5 x 10 <sup>6</sup>    |
| 4      | 2009                    | 4,62      | 55              | 2,5 x 10 <sup>6</sup>    |
| 5      | 2002-2003               | 4,62      | 45              | 2,1 x 10 <sup>6</sup>    |
| 6      | 2007-2008               | 4,41      | 55              | 2,4 x 10 <sup>6</sup>    |
| 7      | 2005-2006               | 4,2       | 45              | 1,9 x 10 <sup>6</sup>    |
| 8      | 2005-2006               | 6,76      | 45              | 3 x 10 <sup>6</sup>      |
| 9      | 2003-2004               | 4         | 45              | 1,8 x 10 <sup>6</sup>    |

Fonte: GRS (2018)

Ainda no ano de 1994 foi elaborado um programa de monitoramento ambiental do aterro visando avaliar a eficácia da técnica de tratamento adotada e os danos ambientais da área. O monitoramento ambiental da área foi realizado mediante um convênio entre a EMLURB e a UFPE através da ATEPE (Associação Tecnológica de Pernambuco), sendo o mesmo realizado pelo Grupo de Resíduos Sólidos da UFPE (GRS).

Segundo Jucá (2003), no ano de 1998 foi utilizada a metodologia de recirculação de chorume como forma de acelerar o processo de biodegradação. No ano de 2002, iniciaram-se as obras de implementação de sistemas de drenagem de gás e lixiviado, como também de um sistema de tratamento de lixiviado.

O tratamento do lixiviado idealizado e implantado foi um tratamento biológico que consistia de 4 lagoas de estabilização, sendo uma anaeróbia, seguida de três facultativas. Também foi adotado um tratamento bioquímico pelo processo de bioremediação. O sistema de tratamento não apresentou a eficiência desejada, possuindo o efluente tratado altos percentuais de DQO e DBO (LINS, 2011).

O encerramento do Aterro Controlado da Muribeca ocorreu em agosto de 2009, quando foi proibida a entrada de resíduos e ocorreu o início das obras de recuperação do aterro. Nas obras de encerramento, os resíduos receberam uma camada de cobertura final, obras de drenagem de águas pluviais e o plantio de vegetação nos taludes e reflorestamento de Mata Atlântica em toda a área.

### 3.2 ENCERRAMENTO DO ATERRO DA MURIBECA

O Encerramento do Aterro da Muribeca teve por base o projeto Executivo de Encerramento Ambiental, elaborado por pesquisadores e professores da Universidade Federal de Pernambuco contratada pela EMLURB (Empresa de Limpeza Urbana do Recife), em outubro de 2008.

Precipualemente, os critérios adotados no projeto de encerramento abordaram obras e sistemas visando baixa manutenção e a necessidade de conceber uma cobertura final, a fim de minimizar a infiltração da precipitação para a massa de resíduos.

A cobertura final foi realizada com solo argiloso de baixa permeabilidade com uma espessura de no mínimo 50 cm, e acima dessa foi depositado um solo para fixação vegetal com no mínimo 10 cm. Visando facilitar o escoamento superficial e minimizar o processo erosivo, o solo foi compactado com uma inclinação de 3-5%.

A cobertura vegetal utilizada priorizou espécies nativas resistentes ao clima da região e que não interferissem na impermeabilização proposta pela cobertura final. Conforme descrito por Lins et al (2011), foram 14.000 espécies nativas da mata atlântica utilizadas como forma de compensação pelo desmatamento da área, além da plantação de gramíneas como forma de evitar processos erosivos.

O sistema de drenagem superficial escolhido foram colchões Reno em concomitância com canaletas pré-moldadas implantadas nas bermas dos taludes, resultando em um total de 1.300m de colchão Reno e 4.000m de canaletas locados ao redor de todo o aterro. Essa solução tinha por finalidade promover escoamento da água superficial para o rio Muribequinha, evitando empossamentos, processos erosivos e o aumento do volume de lixiviado a ser tratado.

Tratando-se do aspecto geotécnico, foi realizada uma geometrização e compactação das células de resíduo como também o estudo da estabilidade de todo aterro. Lins et al. (2011) afirmou que a análise obtida com auxílio da ferramenta GGU-Stability confirmou a estabilidade do aterro atingindo os coeficientes de segurança mesmo quando simulados nas piores condições (excesso de poro-pressão devido a problemas de drenagem).

Por fim, na implementação do projeto de encerramento foram recuperados, em até 5m de profundidade, 90 tubos de drenagem de gás e restaurados 200m de drenos de lixiviados já existentes.

### 3.3 MONITORAMENTO AMBIENTAL PÓS-ENCERRAMENTO

Após o encerramento do aterro da Muribeca, o monitoramento ambiental realizado consistiu em inspeções visuais para a verificação de movimentos de massa ou vazamentos de lixiviado, verificação de recalques por meio de medidas realizadas em marcos superficiais (placas de recalque), monitoramento de parâmetros físico-químico e biológicos de gases e lixiviado, monitoramento de águas do subsolo do aterro e dos recursos hídricos do entorno.

O monitoramento das informações meteorológicas ocorreu até o ano de 2015, quando o equipamento foi roubado inviabilizando novas medições.

Para tanto, no projeto de encerramento foi previsto e realizado o monitoramento de forma periódica onde os parâmetros são avaliados em períodos, conforme pode ser visto na Tabela 12.

Tabela 12 – Periodicidade do monitoramento ambiental

| <b>Monitoramento Ambiental do Aterro da Muribeca</b> | <b>Periodicidade</b> |
|------------------------------------------------------|----------------------|
| Monitoramento geomecânico (Recalque)                 | Trimestral           |
| Monitoramento do biogás                              | Semestral            |
| Monitoramento do lixiviado bruto                     | Trimestral           |
| Monitoramento do efluente tratado                    | Trimestral           |
| Monitoramento das águas superficiais                 | Trimestral           |
| Monitoramento das águas subterrâneas                 | Trimestral           |

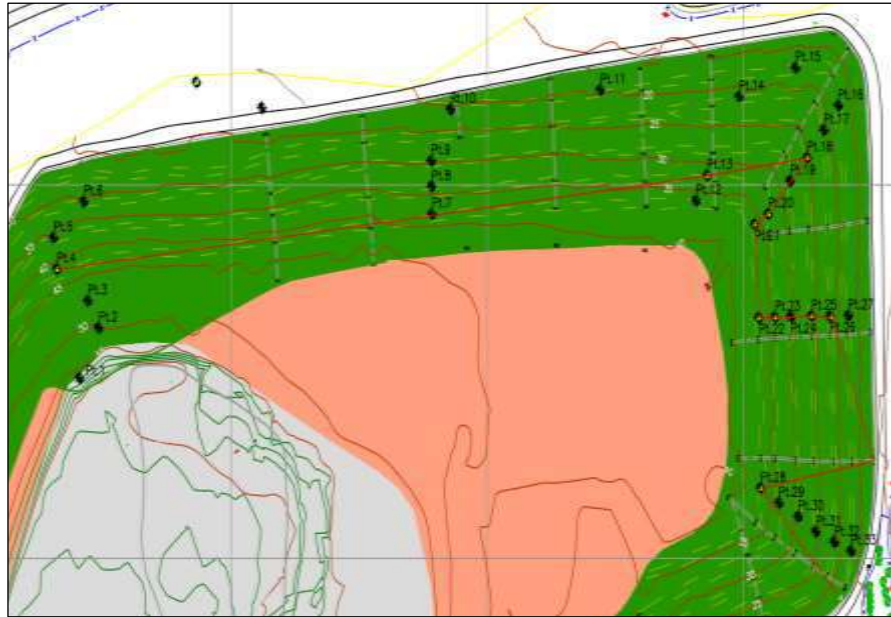
Fonte: GRS (2018)

### 3.4 MONITORAMENTO GEOMECÂNICO

O acompanhamento do recalque ocorre *in situ*, sendo utilizado, para tal, placas de recalque distribuídas pela superfície e marcos externos como base de referência. As medições são realizadas por profissional qualificado utilizando de referências de nível. Para tanto, no Aterro da Muribeca, foram instaladas 33 placas de monitoramento nas bermas e taludes das células 7 e 8, no primeiro trimestre do ano de 2010, como pode ser visto na figura 7.

A escolha das células a serem monitoradas foi devido a maior altura dessas células com maior altura consequentemente possuem maior risco de rompimento.

Figura 7 – Localização das placas de recalque nas células 7 e 8 do aterro da Muribeca



Fonte: GRS (2018)

As placas de recalque são constituídas por uma placa de aço quadrada de 0,6m de lado, com um pino de referência para as medições a serem realizadas por um topógrafo. Como referência, foram instalados marcos irremovíveis fora da área do aterro. A figura 8 abaixo exemplifica uma placa de recalque e um esquema de medição com o propósito de ilustrar o instrumento e procedimento.

Figura 8 – Marco superficial e esquema ilustrativo de medição de recalques



Fonte: GRS (2018)

A partir dos resultados, obtêm-se as cotas, as quais são usadas para o cálculo do recalque parcial por trimestre. O recalque dividido pelos dias entre uma medição

e outra resultam na velocidade de recalque. Ainda foi observada a deformação específica, a qual consiste na relação entre o recalque e a altura inicial dos resíduos.

### 3.5 MONITORAMENTO DO BIOGÁS

O monitoramento dos gases gerados no aterro é feito de duas formas: com a medição dos gases emanados pelos drenos e pela medição das emissões através da camada de cobertura.

O ensaio para obtenção dos valores nos drenos do aterro refere-se ao isolamento de um dreno com uma lona de polietileno e a vedação do mesmo através de amarrações com cordões de borracha. São efetuados dois furos para duas verificações e o resultado a ser utilizado é a média dos dois valores obtidos. Em cada furo é instalado um tubo de PVC com 0.037m de diâmetro e 0.5m de comprimento, e no final do tubo é instalada a haste do anemômetro através de uma perfuração há 0.04m da parte final.

A vazão nos drenos é calculada baseada na Norma BSI 1042-2.3 – 19984 – *Measurement of Fluid flow in closed conduits. Velocity area methods. Methods of flow measurement in swirling or asymmetric flow conditions in circular ducts by means of currentmeters or Pilot static tubes*, pela seguinte equação:

$$Q = v \times A \quad (I)$$

Onde:

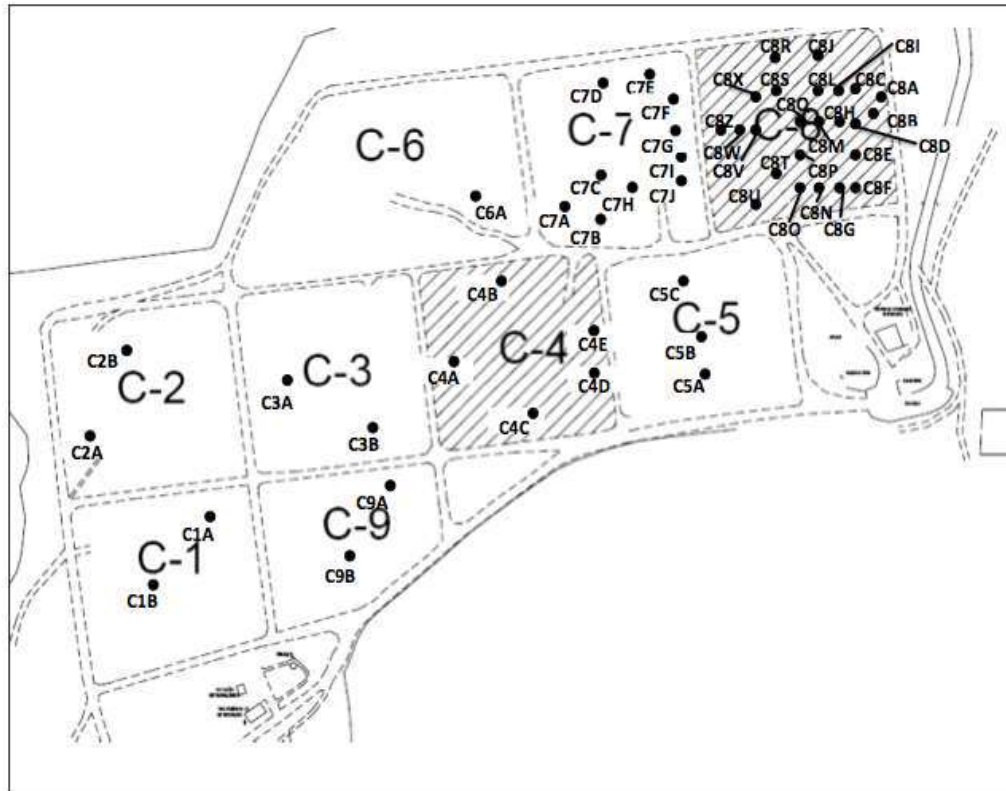
**Q** = vazão do biogás (m<sup>3</sup>/s);

**v** = velocidade do gás (m/s);

**A** = área da seção em que passa o fluxo do gás, no caso, seção do tubo de PVC.

O local onde foi realizado o monitoramento pode ser estimado pela figura 9 que apresenta a distribuição das células do aterro antes do preenchimento dos acessos.

Figura 9 – Distribuição espacial dos drenos de gases do Aterro Muribeca, relatório EMLURB 2017



Fonte: GRS (2017)

O fluxo através da camada de cobertura é determinado com utilização do ensaio de placa, conforme descrito no trabalho de Maciel (2003). Nesse ensaio foi utilizado câmara de fluxo estática onde foram acoplados: manômetro, termômetro, barômetro e analisador de gases. A figura 10 demonstra todos os equipamentos utilizados.

Figura 10 – Equipamentos utilizados para ensaio de Placa



Fonte: Oliveira (2013)

O procedimento para realização do ensaio consiste na cravação da placa em local aleatório do aterro (sem rachaduras para evitar possível fluxo anormal), com o local devendo ser previamente limpo e nivelado. Após a instalação da placa, são acoplados os equipamentos para medição e as laterais da placa são aterradas com solo para evitar vazamentos. As medições são feitas em intervalos pré-estabelecidos (no caso da Muribeca 5 minutos) por um período de 30 a 60 minutos. O cálculo do fluxo de gás é feito com base na equação abaixo:

$$J = V_p/A \times (\Delta C/\Delta t) \quad (II)$$

Onde:

**J** = Fluxo volumétrico (NI/m<sup>2</sup>/dia);

**V<sub>p</sub>** = Volume útil da câmara de fluxo (L);

**A** = Área de solo coberto pela câmara (m<sup>2</sup>);

**ΔC/Δt** = Variação da concentração do gás (% vol.) com o tempo (s).

O cálculo é realizado considerando a CNTP (condições normais de temperatura e pressão), porém, as curvas são corrigidas através das densidades em função da temperatura interna (MACIEL, 2003).

### 3.6 MONITORAMENTO DOS LÍQUIDOS PERCOLADOS

O acompanhamento do Lixiviado Bruto ocorre na estação de tratamento de lixiviado (ETL) do aterro, ocorrendo o preenchimento de uma ficha de inspeção diária com medidas de vazão do lixiviado, precipitação e avaliações das condições meteorológicas locais. Na Figura 11 pode-se ver a ETL da Muribeca.

Figura 11 – Estação de Tratamento de Lixiviados do Aterro da Muribeca



Fonte: Oliveira (2013)

Os dados de precipitação foram obtidos a partir da estação Recife-CURADO/INMET que se localiza a aproximadamente 10 km do aterro Muribeca-PE, mais especificamente na latitude 08° 03'S, longitude 34°57'W, essa estação é utilizada como referência para toda Região Metropolitana do Recife/PE.

O monitoramento qualitativo do lixiviado consiste na coleta de amostras em conformidade com o padrão CETESB (2001), seguida de uma caracterização físico-química e microbiológica do lixiviado, de acordo com o Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2005).

Primeiramente, o procedimento para obter as amostras consiste na coleta de 5 litros de lixiviado, e para isto, é arremessado um recipiente para a coleta contra a corrente, tomando o cuidado para que a amostra não contenha detritos ou folhas. O líquido coletado é então armazenado em frascos estéreis onde posteriormente será mantido a 4°C para as futuras análises (figura 12). As etapas mostradas são: “a)”

preparo dos equipamentos de coleta; “b)” coleta de amostra de lixiviado bruto; “c)” e “d)” acondicionamento das amostras em recipientes estéreis.

Figura 12 – Coleta de amostras de lixiviado bruto Muribeca



Fonte: A autora (2018).

A tabela 13 resume os procedimentos de análise com suas respectivas referências.

Tabela 13 – Principais análises realizadas para caracterização do lixiviado

| PARÂMETRO                                  | UNIDADE   | MÉTODO                                                                      | REFERÊNCIA                                                                                      |
|--------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>DQO</b>                                 | mg/L      | Titulométrico (Digestão com K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> ) | SMEWW 5220 C                                                                                    |
| <b>DBO<sub>5</sub></b>                     | mg/L      | Manométrico                                                                 | Adaptado do SMEWW 5210                                                                          |
| <b>Cor</b>                                 | Hazen     | Fotocolorimétrico                                                           | SMEWW 2120 C                                                                                    |
| <b>Turbidez</b>                            | NTU       | Nefelométrico                                                               | SMEWW 2130 B                                                                                    |
| <b>Alcalinidade</b>                        | mg/L      | Titulométrico                                                               | SMEWW 2320 B                                                                                    |
| <b>Cloretos</b>                            | mg/L      |                                                                             | Spectroquant 14897 – MERCK                                                                      |
| <b>Fósforo Total</b>                       | mg/L      |                                                                             | Spectroquant 14848 – MERCK                                                                      |
| <b>Sulfatos</b>                            | mg/L      | Fotocolorimétrico                                                           | Spectroquant 14791 – MERCK                                                                      |
| <b>pH</b>                                  |           | Potenciométrico                                                             | SMEWW 4500 B                                                                                    |
| <b>Condutividade</b>                       | µS/cm     | Condutância elétrica                                                        | SMEWW 2510 B                                                                                    |
| <b>Série de Sólidos</b>                    | mg/L      | Gravimétrico                                                                | SMEWW 2510 B Série de Sólidos mg/L<br>Gravimétrico Adaptado do SMEWW<br>2540 B, 2540 C, 2540 D. |
| <b>Coliformes Totais e Termotolerantes</b> | NMP/100MI | Colimetria                                                                  | SMEWW 9221 B, C e E                                                                             |

Fonte: Adaptado de GRS<sup>1</sup> (2018)

Apesar de o monitoramento ocorrer nas antigas lagoas de tratamento de lixiviado, cabe destacar que as mesmas são utilizadas como reservatório, sendo o lixiviado do antigo aterro bombeado e tratado na Estação de Tratamento CTR Candeias.

<sup>1</sup> SMEWW: Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater (APHA, 1998).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados discutidos a seguir baseiam-se nos dados obtidos de recalques, emissão de gases e lixiviado.

### 4.1 RECALQUES

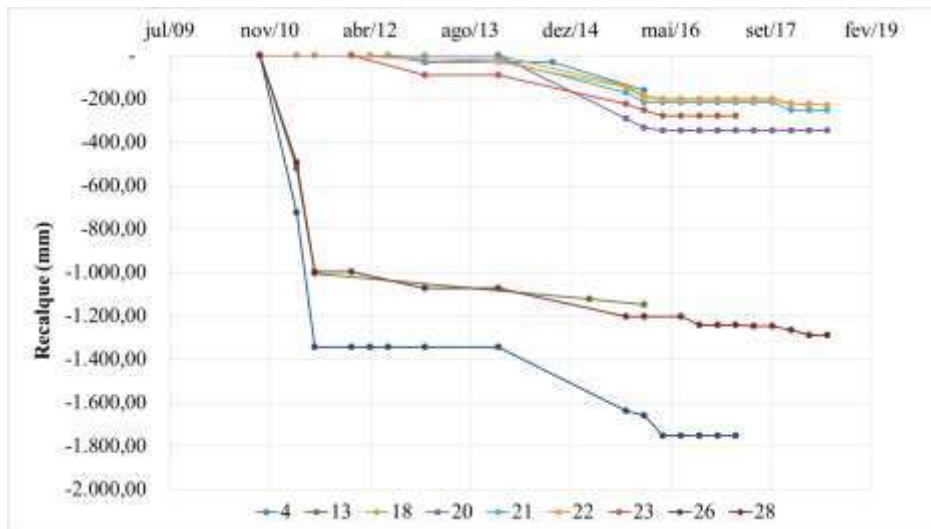
A pesquisa obteve dados de recalques dos anos de 2011 a 2018. Foram instaladas 33 placas que com o passar do tempo foram perdidas ou danificadas restando no ano de 2018 apenas 6.

O local do monitoramento foram as células 7 e 8, últimas células a terem sua atividade encerrada, o posicionamento das placas de recalque pode ser visto na figura 14. A altura inicial dos resíduos variou entre 17,86 e 42,98 metros e a idade estimada é diversificada. Entretanto, as camadas mais superficiais datam de julho de 2009.

A partir dos dados de recalque é possível notar uma redução, nos primeiros anos (2011-2012) as máximas chegaram a 2.750mm e no último ano analisado (2018) a 45mm, ou seja, uma redução de 98,36%. O recalque medido nesse período deve-se apenas a degradação dos resíduos orgânicos putrescíveis sendo o comportamento de diminuição das magnitudes de recalque com o tempo já era esperado mediante a degradação da fração orgânica do resíduo que diminui com o tempo.

No gráfico 3 pode-se observar os valores de recalque no tempo, foram plotadas 9 placas com maior consistência de dados. As placas 13, 26 e 28 tiveram magnitudes totais de recalque maiores com máximas de até 1800 mm, enquanto as outras tiveram máximas de 400 mm. Esse fato pode ter ocorrido devido a dissipações de pressões internas localizadas, bolsões de gases ou lixiviado, além de movimentações devido às estruturas ao redor, tendo em vista que todas as placas se encontram próximas.

Gráfico 3 – Recalque do resíduo com o tempo

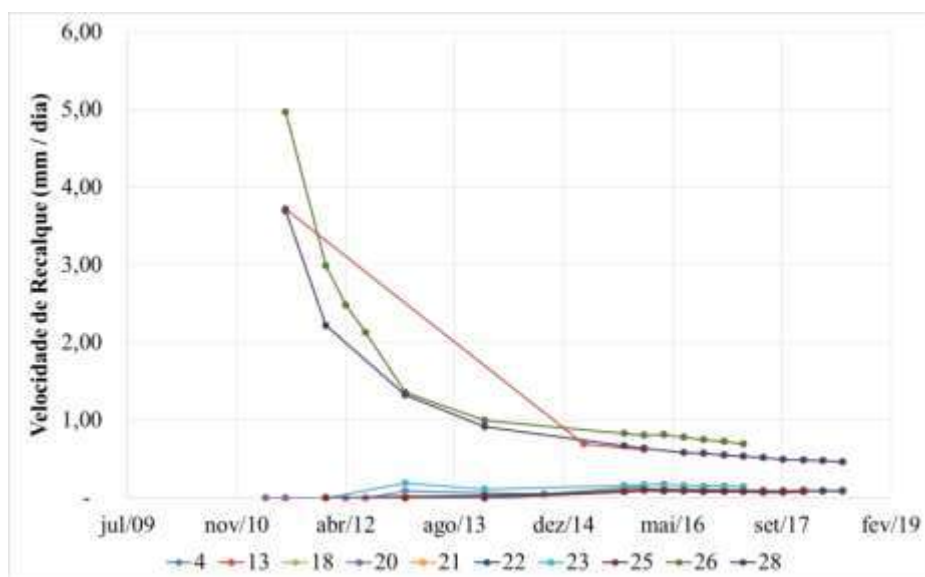


Fonte: A autora (2019)

Ainda é possível notar que a partir de 2016 são desprezíveis as inclinações nas retas de recalques demonstrando claramente a tendência de estabilização de todas as placas.

A velocidade de recalque nos permite observar a relação do recalque com o tempo, os resultados obtidos podem ser observados no gráfico 4. A cerca desse parâmetro temos que nos primeiros dois anos de medição (2011-2012) as velocidades de recalque chegaram a cifra de 16,56 mm/dia tendo esse valor sido reduzido para 0,04mm/dia (2018), totalizando uma redução de 99,77%.

Gráfico 4 – Velocidade de recalque pelo tempo



Fonte: A autora (2019)

A deformação específica é a relação entre o recalque e a altura inicial dos resíduos, a partir dela observa-se que nos anos iniciais (2011 – 2012) são máximas de 10,62% de deformação confrontando as máximas de 0,10% calculadas para o último ano (2018), ou seja, uma redução de 99,03%. A tabela 14 mostra em resumo todos os resultados.

Tabela 14 – Resultados de recalque

| Placa | Altura Inicial dos Resíduos (m) | Tempo de Monitoramento | Recalques (mm) | Velocidade de Recalque (mm/dia) | Deformação Específica(%) |
|-------|---------------------------------|------------------------|----------------|---------------------------------|--------------------------|
| 4     | 42,984                          | Jan/2012 - Jan/2016    | 161            | 0,15                            | 0,37%                    |
| 13    | 33,7222                         | Out/2010 - Jan/2016    | 1147           | 0,62                            | 3,40%                    |
| 18    | 25,895                          | Out/2010 - Jul/2018    | 228            | 0,08                            | 0,88%                    |
| 20    | 34,529                          | Out/2010 - Jul/2018    | 346            | 0,12                            | 1,00%                    |
| 21    | 36,863                          | Out/2010 - Jul/2018    | 252            | 0,09                            | 0,68%                    |
| 22    | 37,768                          | Out/2010 - Jul/2018    | 228            | 0,08                            | 0,60%                    |
| 23    | 34,251                          | Out/2010 - Abr/2017    | 278            | 0,14                            | 0,81%                    |
| 25    | 26,471                          | Out/2010 - Jan/2018    | 187            | 0,07                            | 0,71%                    |
| 26    | 22,237                          | Out/2010 - Abr/2017    | 1751           | 0,69                            | 7,87%                    |
| 28    | 37,158                          | Out/2010 - Jul/2018    | 1289           | 0,46                            | 3,47%                    |

Fonte: A autora (2019)

Em suma, foram monitorados resíduos com altura inicial variando entre 22 e 43 m, com dados pertinentes ao período de outubro de 2010 a Julho de 2018. O recalque acumulado no período de estudo variou entre 160 -1.290mm, a velocidade de recalque tendo em conta o recalque acumulado pelo período de estudo encontra-se na faixa 0,07 – 0,69 mm/dia. A deformação específica está contida entre 0,3 – 8%. Os resultados permitem deduzir que os recalques ocorridos no período pós-encerramento pode se dever a degradação de fração putrescível dos resíduos ou eventuais cargas externas - (tratores existentes na célula para realização de alguma manutenção local ou acúmulo de chuva não escoada).

Mariano (1999) realizou o acompanhamento do recalque da Muribeca nas células 1 e 2. A célula 1 foi monitorada por 252 dias, tendo profundidade variando de 21,85-23,5 metros, nela foram encontrados recalques variando de 71-500mm a deformação específica na célula variou de 0,32-6,5% e as velocidades encontradas variaram de 0,24-2,71mm/dia. Já a célula 2, que possui uma camada de resíduos variando de 13,3-20,75metros, foi observada por 518 dias sendo encontrados valores de recalque variando de 122-778mm, a deformação específica teve uma variação dentre 1,40-7,91% e as velocidades variaram entre 1,25-1,5mm/dia.

Melo (2003) fez a análise dos recalques na célula 4 do aterro da Muribeca composta por uma mistura de resíduos jovens e antigos, a célula foi monitorada por

um intervalo de 3 anos (ago/99 a ago/02). No trabalho do autor considerou uma camada de 15m de resíduo com idade aproximada de 5 anos onde abaixo da mesma, na profundidade de 15 a 29 metros, estariam resíduos de maior idade, cerca de 16 anos. Foram instaladas 12 placas de recalque sendo obtido recalques que variaram dentre 500-2185mm. O autor analisou o recalque em superfície e profundidade considerando a camada de resíduos jovens como responsável pelos recalques encontrados.

Monteiro (2003) também realizou o acompanhamento dos recalques superficiais em células da Muribeca, realizando seus estudos nas células 1 e 4. Na Célula 1 a autora relatou resíduos com aproximadamente 13 anos e uma sobrecamada com resíduos mais novos com cerca de 1 ano, com referência ao recalque foram encontrados valores variando entre 162-454mm. Já com relação à velocidade esta variou entre 0,35-1,215mm/dia. Na célula 4, que a autora descreve como possuidora de 15m de resíduos com 1 ano e de 15 a 29 metros de resíduos com idade aproximada de 13anos, foram encontrados recalques variando de 500-2185mm. Para os dados encontrados nas células 4 a autora calculou deformações específicas encontrado os valores 4,43% e 11,22%.

Denardin (2013) monitorou o aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio na cidade de Minas do Leão- RS, que funcionou entre os anos de 2001-2007, sendo encerrado com alturas de resíduos variando entre 13,5-24,0m. O monitoramento ocorreu entre 2007-2012 durando 65 meses. Os recalques variaram entre 1700-4000mm, com velocidades de recalque 3,0-7,0mm/dia e deformação específica 11,5-24,2%.

Eyay (2016) ao analisar o aterro de São Leopoldo, Santa Catarina- RS que funcionou entre os anos de 2011 e 2014, sendo encerrado com alturas de resíduo que variaram entre 5,0-9,0m. O monitoramento ocorreu em 2014-2016, totalizando 16 meses de acompanhamento. Os recalques variaram entre 220-1300mm, velocidade de recalque 0,4-3,5 e a deformação específica entre 3,0-8,0%.

Corrêa, Elk e Ritter (2017) monitoraram o antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu – RJ que funcionou entre os anos de 1987 – 2003, sendo encerrado com alturas de resíduos que variaram 35,44-51,12m. O monitoramento foi realizado em fevereiro de 2008 até setembro de 2015, totalizado 2771 dias de acompanhamento. O estudo encontrou recalques variando entre 79-204mm, com

velocidades de recalque de 0,029-0,333mm/dia e deformações específicas de 0,16-0,41%.

A partir dos resultados encontrados publicações, é possível observar o efeito do tempo no parâmetro de recalque, onde se observa que resíduos mais novos tem magnitudes maiores que aqueles mais antigos. Todos os autores já citados correlacionam a diminuição da magnitude do recalque com a diminuição da atividade microbiológica decorrente da diminuição do percentual de matéria orgânica.

O acompanhamento dos recalques com o tempo pós encerramento do aterro da Muribeca permite afirmar que após 9 anos do término das atividades os recalques tenderam a estabilização com as medidas tendendo a 0 sendo os recalques que ainda ocorrem associados a fase metanogênica de degradação da parcela orgânica ainda existente podendo ser comprovada pela produção de biogás.

## 4.2 GASES

Um aterro ativo produz volumes superiores a 180 metros cúbicos de biogás por tonelada de resíduos, nesse montante cerca de 50% é de metano. Após o encerramento das atividades a carga orgânica diminui devido à decomposição resultando em uma diminuição do volume de gases gerados, ainda segundo os autores chegando a valores próximos a 5 metros cúbicos de biogás por tonelada de resíduos com uma participação de cerca de 10% de metano em aterros com mais de 20 anos (OBLADEN, OBLADEN e BARROS, 2009).

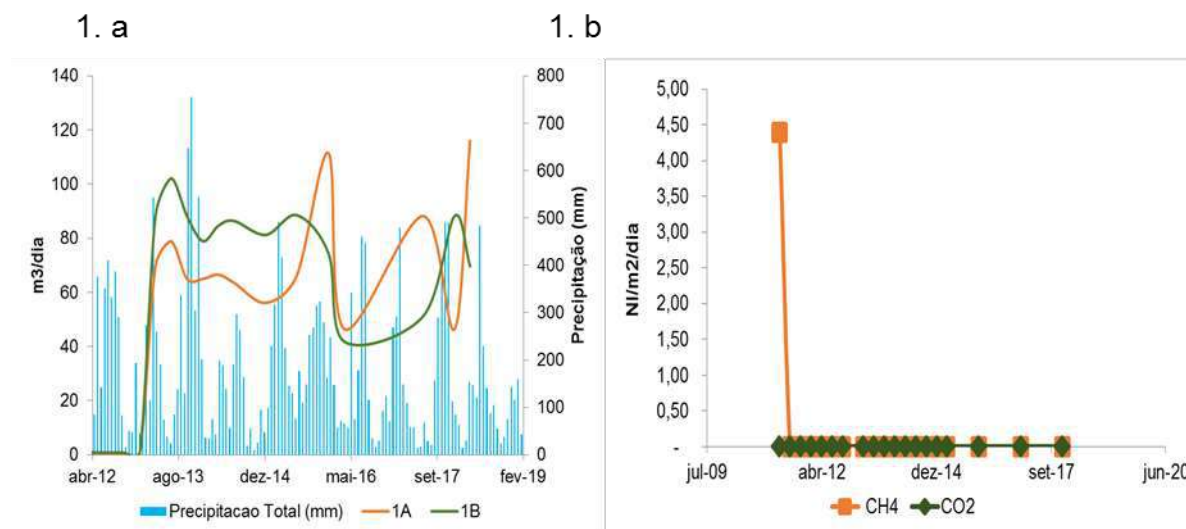
No estudo foram monitoradas as emissões de gases com acompanhamento das vazões nos drenos e na camada de cobertura, os resultados foram obtidos para cada uma das 9 células em conformidade com as localizações mencionadas na metodologia. A seguir são apresentadas as características básicas de cada uma das células:

- Célula 1: foi encerrada dentre os anos de 2003 e 2004, possui uma área de cerca de 4ha, cota máxima de 45 metros e um volume estimado em  $1,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 2: foi encerrada dentre os anos de 2007 e 2008, possui uma área de cerca de 4,20 ha, cota máxima de 55 metros e um volume estimado em  $2,3 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

- Célula 3: foi encerrada em 2009, possui uma área de cerca de 4,62ha, cota máxima de 55 metros e um volume estimado em  $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 4: foi encerrada em 2009, possui uma área de cerca de 4,62ha, cota máxima de 55 metros e um volume estimado em  $2,5 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 5: foi encerrada dentre os anos de 2002 e 2003, possui uma área de cerca de 4,62ha, cota máxima de 45 metros e um volume estimado em  $2,1 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 6: foi encerrada dentre os anos de 2007 e 2008, possui uma área de cerca de 4,41ha, cota máxima de 55 metros e um volume estimado em  $2,4 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 7: foi encerrada dentre os anos de 2005 e 2006, possui uma área de cerca de 4,20ha, cota máxima de 45 metros e um volume estimado em  $1,9 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 8: foi encerrada dentre os anos de 2005 e 2006, possui uma área de cerca de 6,76 ha, cota máxima de 45 metros e um volume estimado em  $3 \times 10^6 \text{ m}^3$ .
- Célula 9: foi encerrada dentre os anos de 2003 e 2004, possui uma área de cerca de 4ha, cota máxima de 45 metros e um volume estimado em  $1,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Os resultados de emissões pelos drenos são apresentados nos gráficos 5 a 13. Cada representação foi numerada de 1 a 9, de acordo com o número da célula sendo os dados representados por (a) referentes as vazões pelos drenos e (b) aos resultados de fluxo pela camada de cobertura.

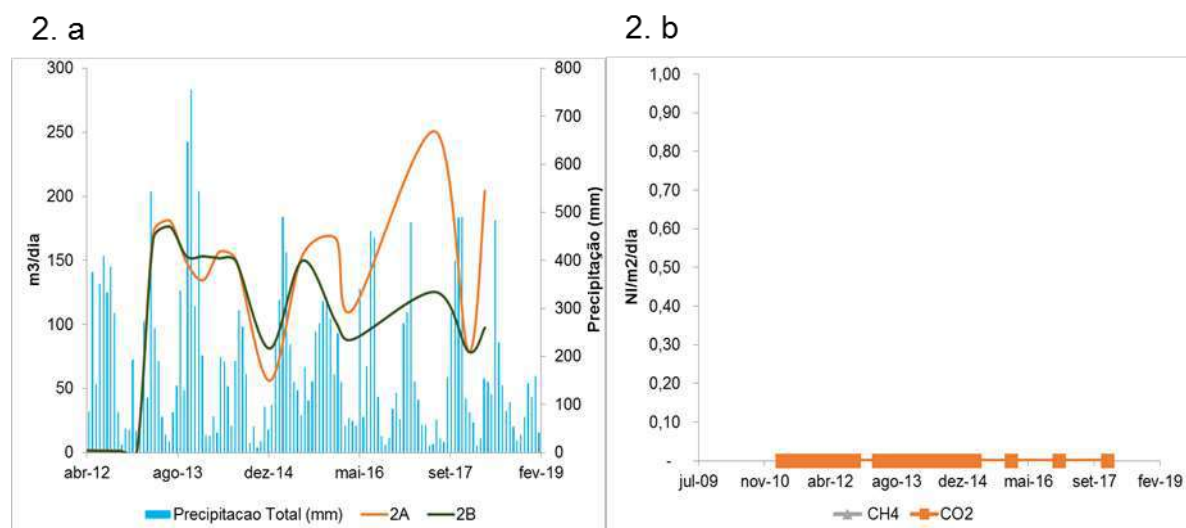
Gráfico 5 – Dados de Biogás da Célula 1



Fonte: A autora (2019)

Na célula 1 apenas detectada emissões de metano na camada de cobertura de 4,39 NI/m²/dia em 2011 não havendo mais detecções fora desse período. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2011 variando de uma média 0,89m³/dia para 82,02 m³/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 2,36% com uma média de 80,08 m³/dia para o ano de 2018.

Gráfico 6 – Emissões de Biogás da Célula 2

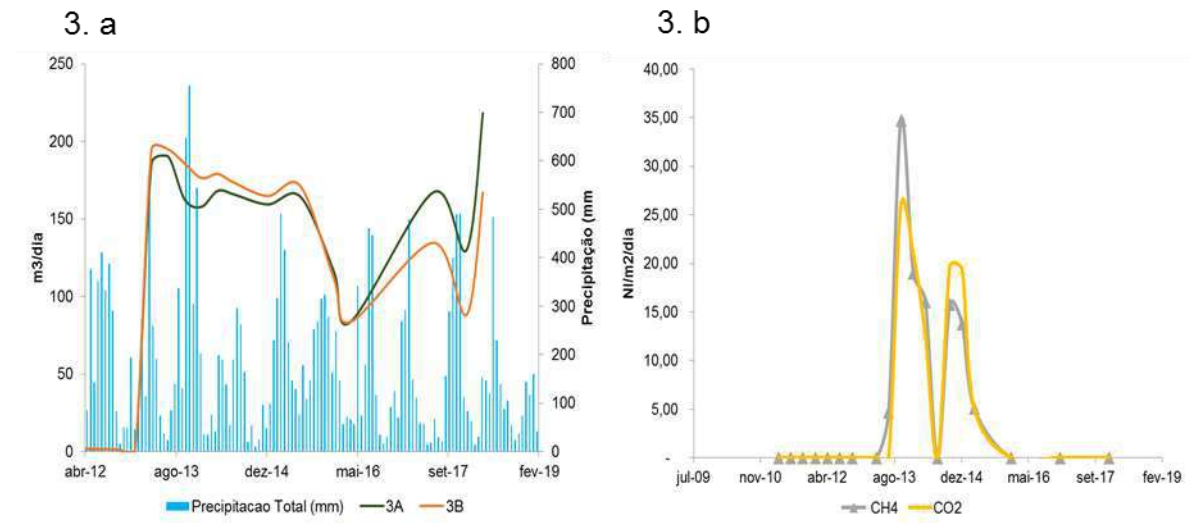


Fonte: A autora (2019)

No que tange as emissões pela camada nota-se que na células 2 não foram observadas emissões no período estudado. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2011 variando de uma média 1,57m³/dia para 166,36 m³/dia, após esse período a célula teve uma redução de 30,93% com uma média de

114,90 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

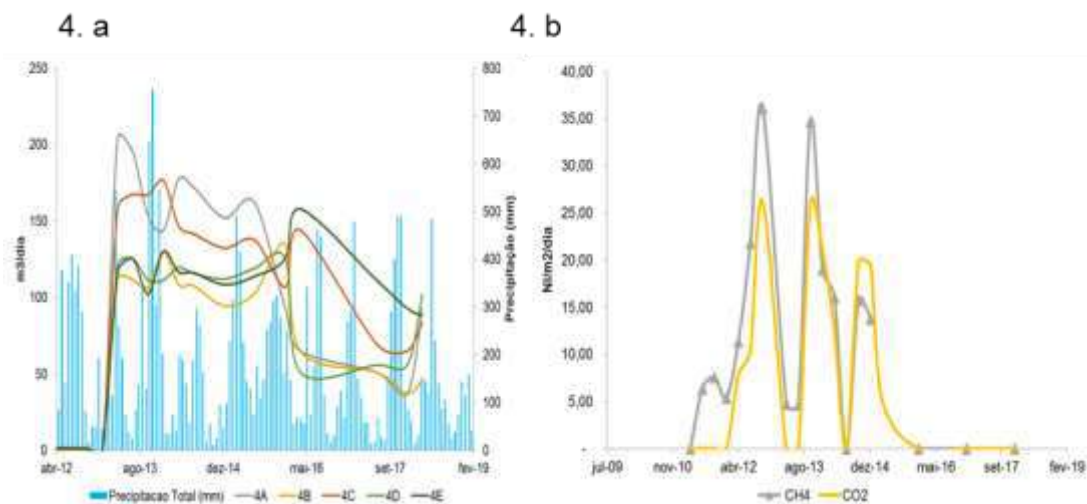
Gráfico 7 – Emissões de Biogás da Célula 3



Fonte: A autora (2019)

Na célula 3 foram encontradas emissões no período de 2011-2015 onde o metano teve máxima de 36,15 Nl/m<sup>2</sup>/dia enquanto o dióxido de carbono 25,98 Nl/m<sup>2</sup>/dia. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 1,97m<sup>3</sup>/dia para 185,70 m<sup>3</sup>/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 18,75% com uma média de 150,88 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

Gráfico 8 – Emissões de Biogás da Célula 4

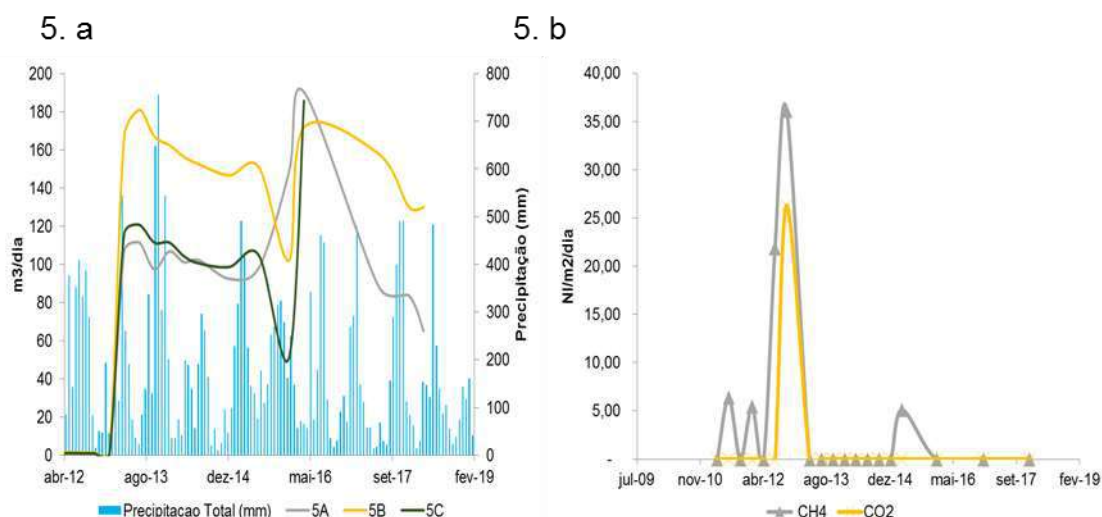


Fonte: A autora (2019)

Na célula 4 as emissões de metano foram observadas nos anos de 2011 a

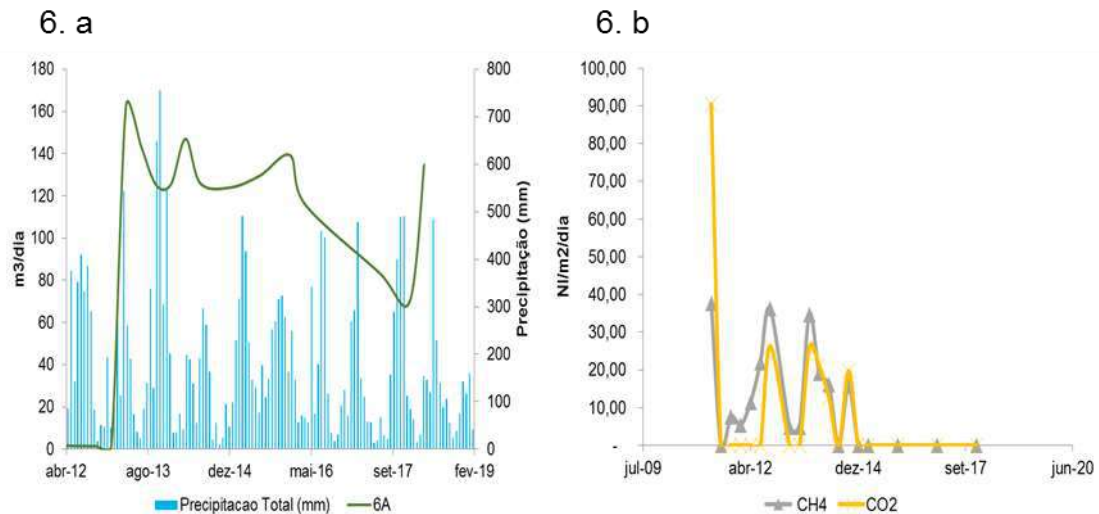
2015 com máxima de 36,15 NI/m<sup>2</sup>/dia enquanto que o dióxido de carbono entre os anos de 2012-2015 com máxima de 26,30 NI/m<sup>2</sup>/dia. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 1,36m<sup>3</sup>/dia para 138,35 m<sup>3</sup>/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 49,33% com uma média de 70,10 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

Gráfico 9 – Emissões de Biogás da Célula 5



Ainda na célula 5 foram observadas emissões pela camada de cobertura, o metano foi detectado nos anos de 2011-2015 com máxima de 36,15 NI/m<sup>2</sup>/dia, o dióxido de carbono apenas foi detectado nos anos de 2012 com um valor de 26,30 NI/m<sup>2</sup>/dia. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 1,56m<sup>3</sup>/dia para 131,02 m<sup>3</sup>/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 22,05% com uma média de 102,14 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

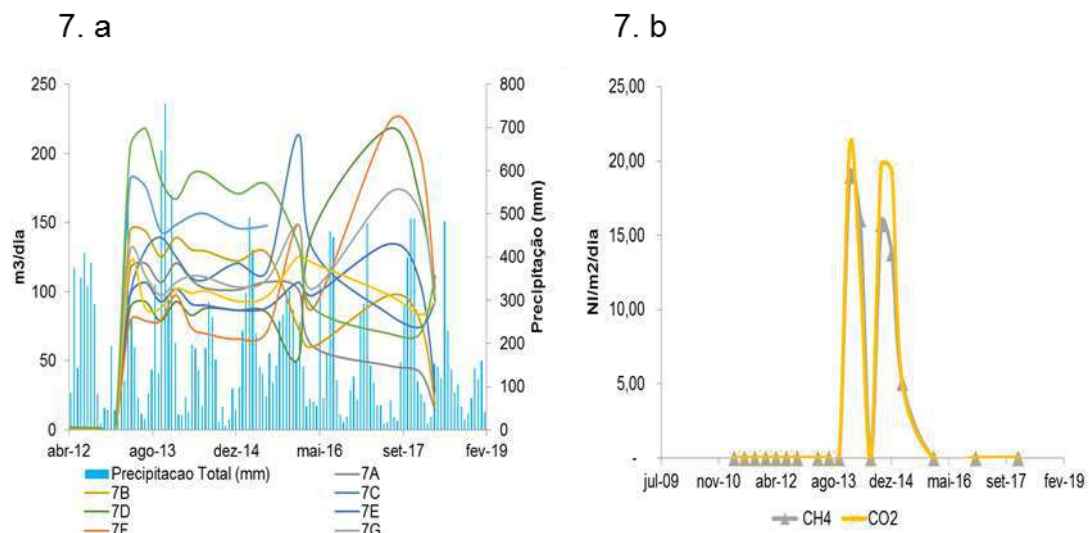
Gráfico 10 – Emissões de Biogás da Célula 6



Fonte: A autora (2019)

Na célula 6 foram detectadas emissões no período que compreende 2011-2014 onde observa-se máxima de 36,67 NI/m²/dia e 90,42 NI/m²/dia para metano e dióxido de carbono respectivamente. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 2,02m³/dia para 143,92 m³/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 29,03% com uma média de 102,14 m³/dia para o ano de 2018.

Gráfico 11 – Emissões de Biogás da Célula 7

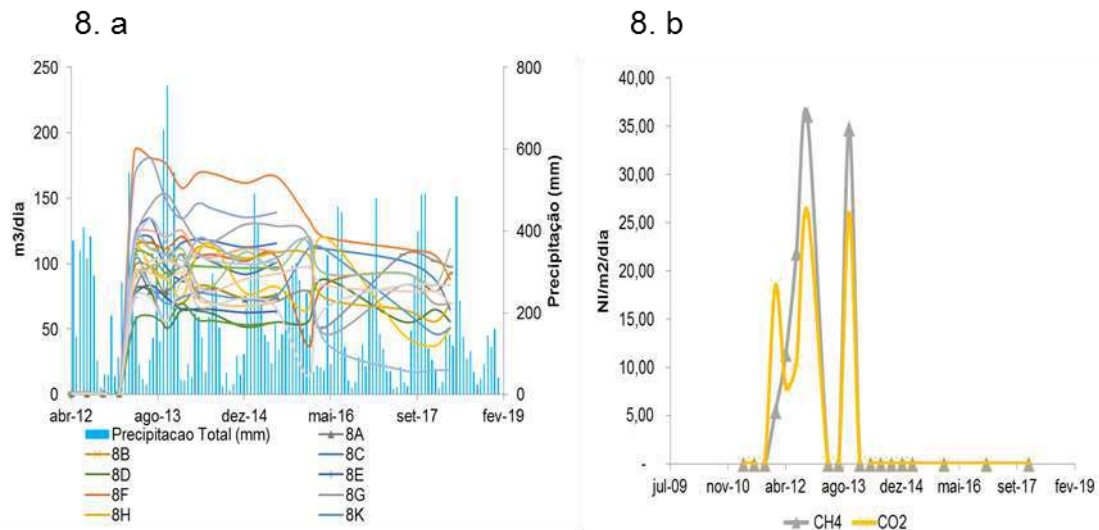


Fonte: A autora (2019)

Na célula 7 foram observadas emissões no período de 2014-2015 com

máximas de 19,03 NI/m<sup>2</sup>/dia para o metano e 21,04 NI/m<sup>2</sup>/dia para o dióxido de carbono. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 1,27m<sup>3</sup>/dia para 121,94 m<sup>3</sup>/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 25,76% com uma média de 90,53 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

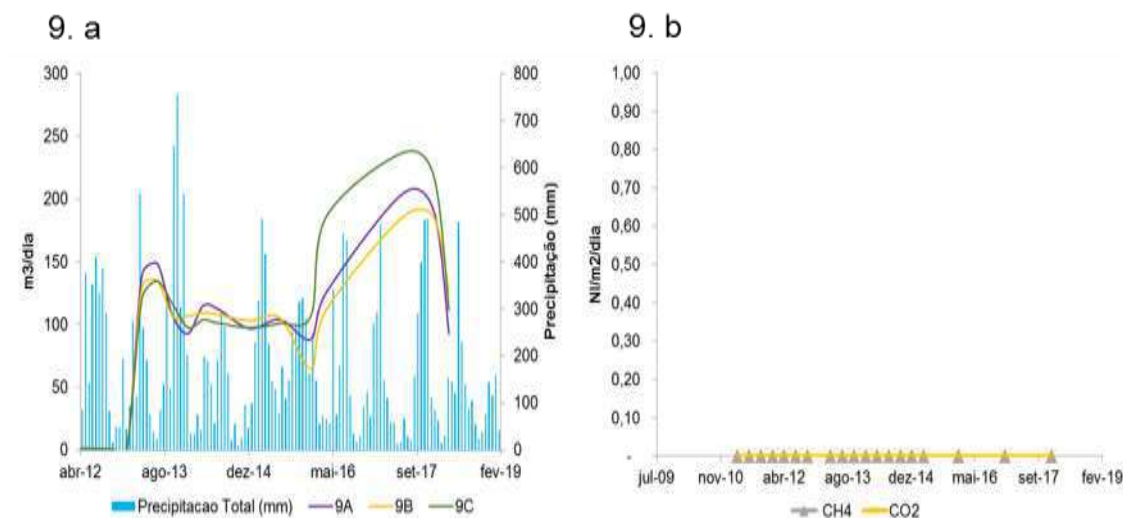
Gráfico 12 – Emissões de Biogás da Célula 8



Fonte: A autora (2019)

Por fim na célula 8 foram identificadas emissões no período de 2012-2013 com máxima de 36,15 NI/m<sup>2</sup>/dia para metano e 26,30 NI/m<sup>2</sup>/dia para o dióxido de carbono. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 0,98m<sup>3</sup>/dia para 103,36 m<sup>3</sup>/dia, após esse período a célula teve uma pequena redução de 31,59% com uma média de 70,71 m<sup>3</sup>/dia para o ano de 2018.

Gráfico 13 – Emissões de Biogás da Célula 9



Fonte: A autora (2019)

No que tange as emissões pela camada nota-se que na células 9 não foram observadas emissões no período estudado. O fluxo de biogás teve um aumento nos anos de 2010-2013 variando de uma média 1,25m³/dia para 126,38 m³/dia, após esse período a célula teve um aumento de 21,84% com uma média de 153,98 m³/dia para o ano de 2018.

Em suma, pode-se observar que em nenhuma das células foi identificada emissão pela camada de cobertura desde o ano de 2016, tal fato pode ser associado a obras de melhoria na camada final que podem ter tido efeito desviando o fluxo da camada superficial para os drenos.

O fluxo nos drenos foi monitorado no período de 2010-2018, nota-se um considerável aumento de vazões em todos os drenos nos anos de 2012 e 2013, esse fato pode ser explicado pelas obras de encerramento do aterro onde foram recuperados os drenos já existentes e foi implantada a camada de cobertura final. A camada de cobertura pode ter atuado minimizando o escape de gases via superfície e as reformas nos drenos os tornaram mais eficientes, explicando assim o aumento ocorrido.

Ainda se salienta que uma das medidas ocorridas em 2017 foi desprezada devido a constatação de erros no equipamento que resultaram em picos, o erro foi comprovado nas medidas realizada ainda no mesmo ano que seguiam a tendência de valores já prevista.

A partir do balanço hídrico observa-se que as estações mais chuvosas são em sua maioria coincidentes com picos nas medições de vazão pelos drenos, tal fato pode ser atribuído a diminuição da permeabilidade da camada de cobertura saturada. Quando comparado a influência da precipitação nos resultados de vazão observa-se que o fluxo apresenta picos nas estações de chuva e diminuições nas épocas de menor pluviometria. Costa et al. (2018) relata que o aumento da umidade em camadas de cobertura, simulando situações de chuva, melhora a eficiência da mesma, tal fato pode diminuir as emissões pela camada e acrescentar volume de gás aos drenos do aterro.

Nas tabelas 15 a 17 são apresentadas as estatísticas descritivas para os anos de 2010-2011, 2013, 2018. Para melhor entendimento do comportamento dos dados, a Tabela 18 apresenta a estatística descritiva aplicada aos dados coletados em todo o período de estudo sendo também apresentado comportamento (redução ou aumento) resultado da comparação entre as médias do ano de 2013 e 2018.

Tabela 15 – Fluxo de biogás pelos drenos Muribeca-PE, anos de 2010-2011

|          | 2010-2011          |                    |                   |                           |                             |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
|          | Mínimo<br>(m³/dia) | Máximo<br>(m³/dia) | Média<br>(m³/dia) | Desvio Padrão<br>(m³/dia) | Coefficiente<br>de Variação |
| Célula 1 | 0,55               | 1,58               | 0,89              | 0,38                      | 43,16%                      |
| Célula 2 | 0,84               | 2,04               | 1,57              | 0,35                      | 22,42%                      |
| Célula 3 | 1,58               | 2,69               | 1,97              | 0,41                      | 20,88%                      |
| Célula 4 | 1,02               | 2,14               | 1,36              | 0,42                      | 30,78%                      |
| Célula 5 | 1,02               | 2,28               | 1,56              | 0,55                      | 35,27%                      |
| Célula 6 | 1,72               | 2,32               | 2,02              | 0,43                      | 21,11%                      |
| Célula 7 | 0,50               | 2,32               | 1,27              | 0,43                      | 33,99%                      |
| Célula 8 | 0,42               | 2,18               | 0,98              | 0,39                      | 39,73%                      |
| Célula 9 | 0,98               | 1,68               | 1,25              | 0,38                      | 29,96%                      |

Fonte: A autora (2019)

Tabela 16 – Fluxo de biogás pelos drenos Muribeca-PE, ano de 2013

|          | 2013               |                    |                   |                           |                             |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
|          | Mínimo<br>(m³/dia) | Máximo<br>(m³/dia) | Média<br>(m³/dia) | Desvio Padrão<br>(m³/dia) | Coefficiente<br>de Variação |
| Célula 1 | 65,00              | 102,14             | 82,02             | 13,67                     | 16,66%                      |
| Célula 2 | 148,56             | 181,06             | 166,36            | 12,94                     | 7,78%                       |
| Célula 3 | 162,49             | 194,99             | 185,70            | 12,11                     | 6,52%                       |
| Célula 4 | 102,14             | 204,27             | 138,35            | 33,21                     | 24,00%                      |
| Célula 5 | 97,49              | 181,06             | 131,02            | 31,47                     | 24,02%                      |
| Célula 6 | 125,35             | 162,49             | 143,92            | 18,57                     | 12,90%                      |
| Célula 7 | 78,92              | 218,20             | 121,94            | 38,42                     | 31,50%                      |
| Célula 8 | 51,07              | 185,70             | 103,36            | 30,21                     | 29,23%                      |
| Célula 9 | 106,78             | 148,56             | 126,38            | 14,64                     | 11,58%                      |

Fonte: A autora (2019)

Tabela 17 – Fluxo de biogás pelos drenos Muribeca-PE, ano de 2018

|          | 2018               |                    |                   |                              |                             |
|----------|--------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|
|          | Mínimo<br>(m³/dia) | Máximo<br>(m³/dia) | Média<br>(m³/dia) | Desvio<br>Padrão<br>(m³/dia) | Coefficiente de<br>Variação |
| Célula 1 | 46,43              | 116,06             | 80,08             | 29,45                        | 36,78%                      |
| Célula 2 | 78,92              | 204,27             | 114,90            | 60,22                        | 52,41%                      |
| Célula 3 | 88,21              | 218,20             | 150,88            | 55,26                        | 36,62%                      |
| Célula 4 | 37,14              | 102,14             | 70,10             | 24,80                        | 35,38%                      |
| Célula 5 | 65,00              | 129,99             | 102,14            | 33,05                        | 32,35%                      |
| Célula 6 | 69,64              | 134,63             | 102,14            | 45,96                        | 45,00%                      |
| Célula 7 | 13,93              | 199,63             | 90,53             | 49,37                        | 54,53%                      |
| Célula 8 | 18,57              | 111,42             | 70,71             | 24,37                        | 34,46%                      |
| Célula 9 | 92,85              | 218,20             | 153,98            | 50,64                        | 32,89%                      |

Fonte: A autora (2019)

Tabela 18 – Fluxo de biogás pelos drenos Muribeca-PE, 2010 a 2018

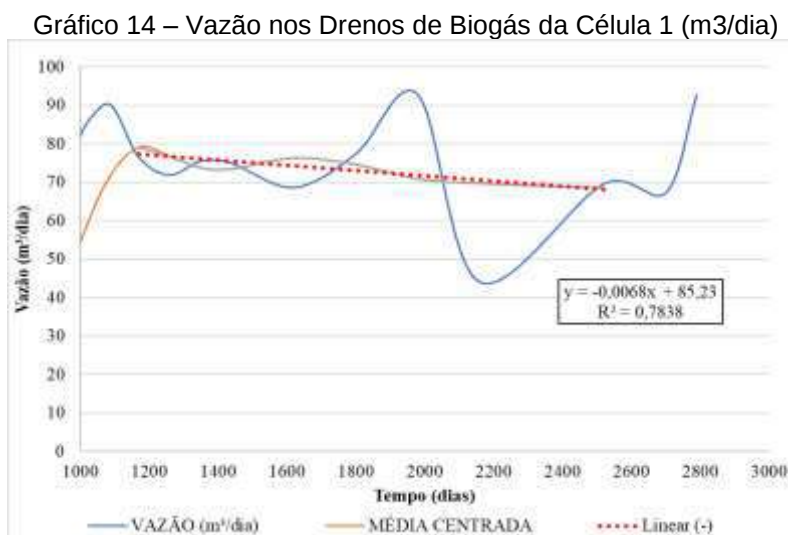
|          | Dados Gerais (2010-2018) |                    |                   |                              |                             |                              |
|----------|--------------------------|--------------------|-------------------|------------------------------|-----------------------------|------------------------------|
|          | Mínimo<br>(m³/dia)       | Máximo<br>(m³/dia) | Média<br>(m³/dia) | Desvio<br>Padrão<br>(m³/dia) | Coefficiente<br>de Variação | Comportamento<br>(2013-2018) |
| Célula 1 | 0,42                     | 116,06             | 43,02             | 40,05                        | 93,09%                      | -2,36%                       |
| Célula 2 | 0,84                     | 250,70             | 83,34             | 76,56                        | 91,86%                      | -30,93%                      |
| Célula 3 | 1,44                     | 218,20             | 93,79             | 82,05                        | 87,49%                      | -18,75%                      |
| Célula 4 | 0,84                     | 204,27             | 71,93             | 62,82                        | 87,33%                      | -49,33%                      |
| Célula 5 | 0,88                     | 190,35             | 77,58             | 66,10                        | 85,21%                      | -22,05%                      |
| Célula 6 | 1,44                     | 162,49             | 81,93             | 63,57                        | 77,60%                      | -29,03%                      |
| Célula 7 | 0,50                     | 222,84             | 70,11             | 63,12                        | 90,03%                      | -25,76%                      |
| Célula 8 | 0,42                     | 185,70             | 56,55             | 50,49                        | 89,29%                      | -31,59%                      |
| Célula 9 | 0,74                     | 236,77             | 86,70             | 67,03                        | 77,31%                      | 21,84%                       |

Fonte: A autora (2019)

Em suma, todas as células, a exceção da 9, tiveram tendência a redução de emissões pelos drenos. O aumento de emissões observado no período de 2012 a 2013 pode ser atribuído a eficiência da camada de cobertura comprovada pela diminuição progressiva de emissões pela superfície como visto anteriormente. A diminuição do volume de biogás observado no comportamento das células 1 a 8 pode ser explicado pela evolução da fase de metanogênese na qual a diminuição da atividade bacteriana diminui a quantidade de biogás produzido.

#### 4.2.1 Análise das tendências de fluxo de biogás pelos Drenos

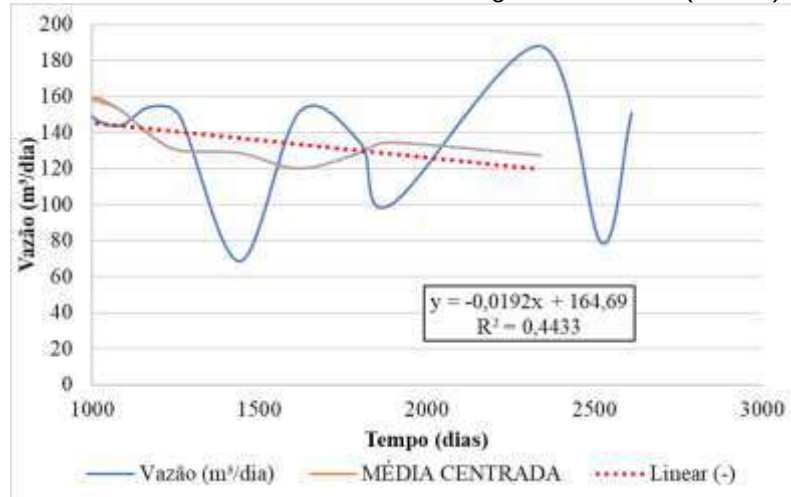
As tendências de fluxo de biogás pelos Drenos do aterro da Muribeca foram estudadas conforme metodologia da Decomposição Clássica de Séries Temporais, sendo considerado o dia 0 como o primeiro do monitoramento, as equações foram determinadas conforme regressão linear gerada a partir dos dados da média centrada conforme comportamento após os anos de 2013-2014. Os resultados são demonstrados por célula, estando nos gráficos 14 ao 22 a equação e o teste R de aderência.



A célula 1 apresentou dados provenientes de 2 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou picos coincidentes com épocas de maior pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo

de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência a redução com coeficiente angular de -0,007 e aderência de 78%.

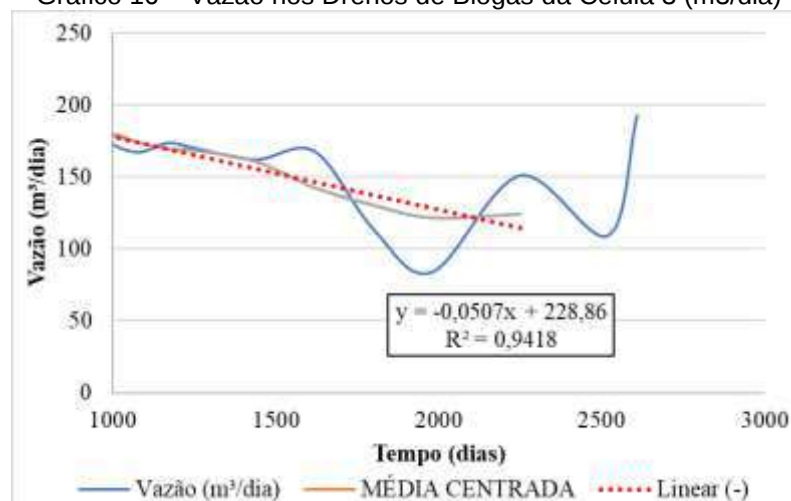
Gráfico 15 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 2 (m<sup>3</sup>/dia)



Fonte: A autora (2019)

A célula 2 apresentou dados provenientes de 2 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou picos coincidentes com épocas de maior pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,019 e aderência de 45%.

Gráfico 16 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 3 (m<sup>3</sup>/dia)

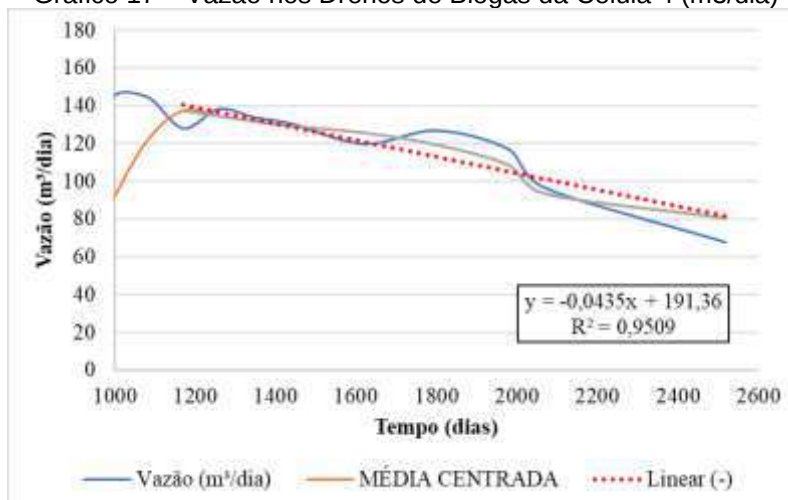


Fonte: A autora (2019)

A célula 3 apresentou dados provenientes de 2 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou picos coincidentes com épocas de maior

pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,05 e aderência de 94%.

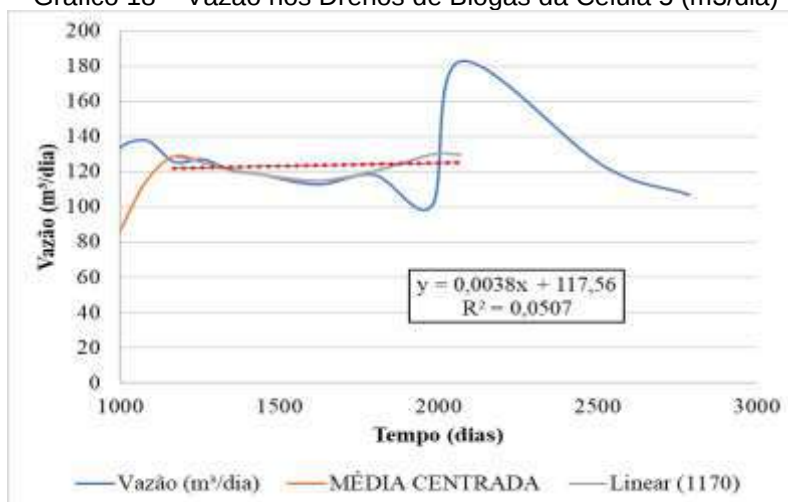
Gráfico 17 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 4 (m<sup>3</sup>/dia)



Fonte: A autora (2019)

A célula 4 apresentou dados provenientes de 3 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou picos coincidentes com épocas de maior pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,04 e aderência de 95%.

Gráfico 18 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 5 (m<sup>3</sup>/dia)

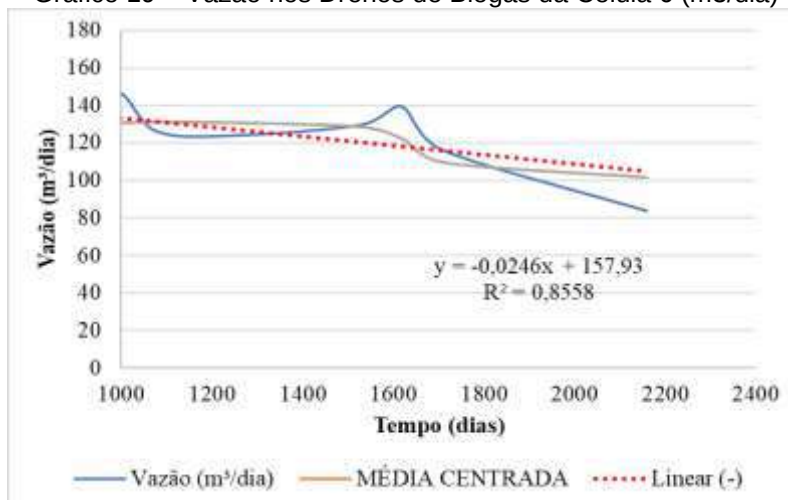


Fonte: A autora (2019)

A célula 5 apresentou dados provenientes de 3 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou picos coincidentes com épocas de maior

pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à aumento com coeficiente angular de 0,004 e não houve aderência aos resultados da célula.

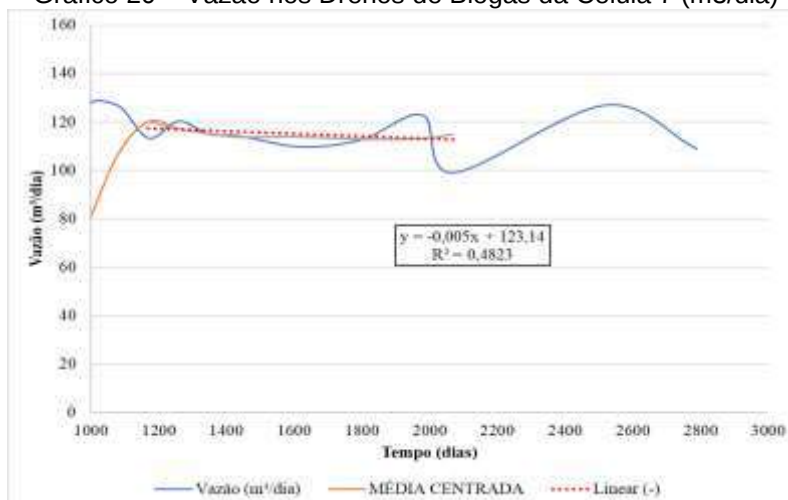
Gráfico 19 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 6 (m³/dia)



Fonte: A autora (2019)

A célula 6 apresentou dados provenientes de 1 dreno, o comportamento da média dos resultados apresentou um pico coincidente com épocas de maior pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,025 e aderência de 85%.

Gráfico 20 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 7 (m³/dia)

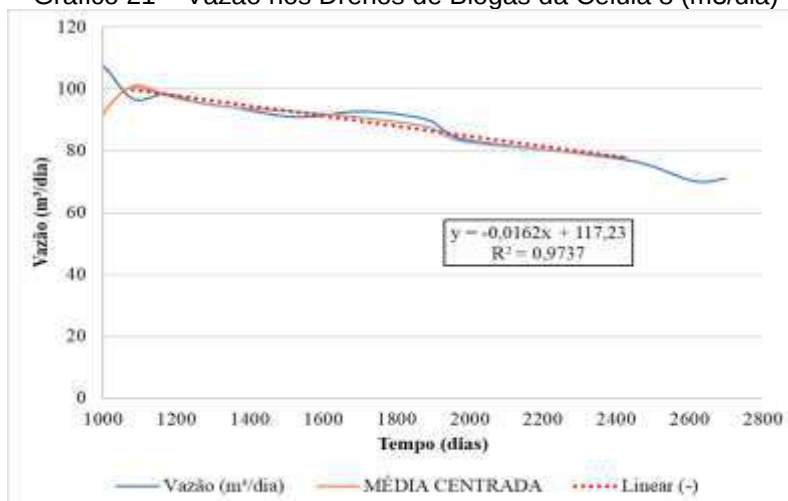


Fonte: A autora (2019)

A célula 7 apresentou dados provenientes de 10 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou um pico coincidente com épocas de maior

pluviometria e diminuição do fluxo em épocas de menos índice de chuvas. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,005 e aderência de 48%.

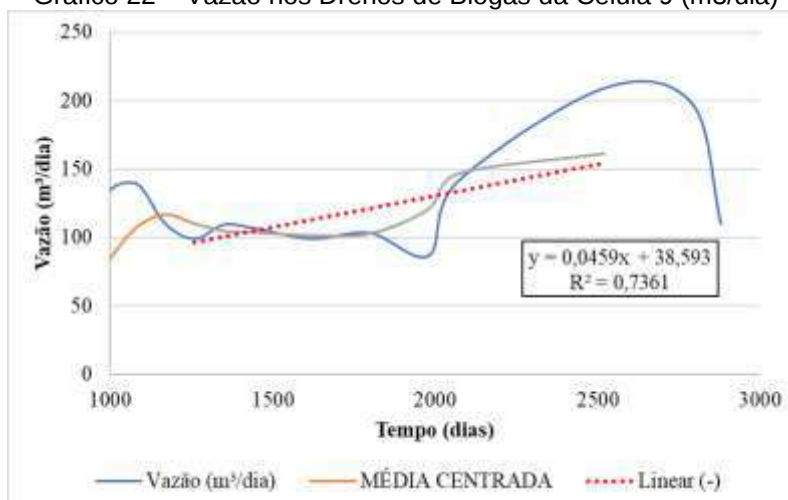
Gráfico 21 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 8 (m<sup>3</sup>/dia)



Fonte: A autora (2019)

A célula 8 apresentou dados provenientes de 25 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou um comportamento mais linear claramente de redução. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência à redução com coeficiente angular de -0,02 e aderência de 97%.

Gráfico 22 – Vazão nos Drenos de Biogás da Célula 9 (m<sup>3</sup>/dia)



Fonte: A autora (2019)

A célula 9 apresentou dados provenientes de 3 drenos, o comportamento da média dos resultados apresentou um comportamento mais linear claramente de

redução. O estudo de tendência para o fluxo da célula apresentou uma tendência ao aumento com coeficiente angular de 0,05 e aderência de 74%.

A partir da análise das séries temporais é possível concluir que a tendência por médias centradas tem teste de aderência para a equação linear acima de 70% em 6 das 9 células. Dentre as estimativas de tendência apenas a célula 9 apresenta uma estiva crescente conforme estudo. Estando as células 1,3,4,6 e 8 com estimativas negativas.

O estudo da tendência por decomposição clássica de séries temporais apresentou-se como satisfatório para os dados de análise do fluxo de biogás pelos drenos do aterro.

#### 4.3 LIXIVIADO

O monitoramento quantitativo do lixiviado bruto foi realizado no período de 2009-2013, os valores de vazão média mensal no primeiro ano de encerramento (2009) encontravam-se na faixa de 43 – 87 m<sup>3</sup>/dia e no último ano documentado (2013) a faixa de valores era 19-31 m<sup>3</sup>/dia uma redução de 69,09% que pode ser atribuída a camada final realizada com solo argiloso com características impermeabilizantes. Os valores obtidos podem ser observados na tabela 19 abaixo.

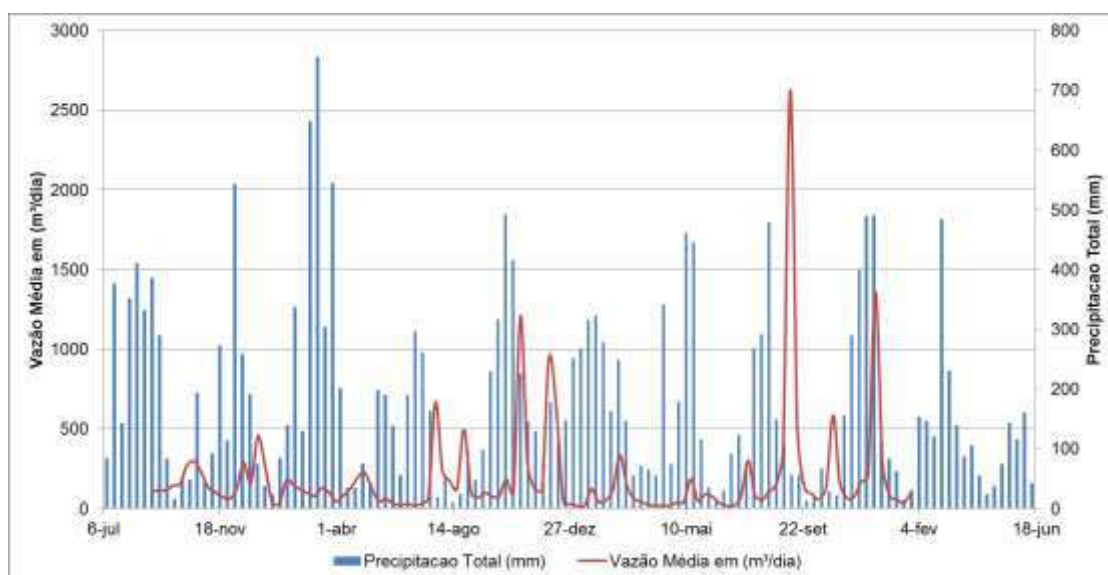
Tabela 19 – Monitoramento da vazão média mensal do lixiviado bruto do aterro da Muribeca.

|                                | 2009   | 2013   | (2009-2013) |
|--------------------------------|--------|--------|-------------|
| <b>MÉDIA</b>                   | 86,40  | 26,71  | 164,41      |
| <b>DESVIO PADRÃO</b>           | 43,20  | 6,68   | 139,09      |
| <b>COEFICIENTE DE VARIAÇÃO</b> | 50,00% | 24,99% | 84,60%      |
| <b>VALOR MÁXIMO</b>            | 129,60 | 30,88  | 544,40      |
| <b>VALOR MÍNIMO</b>            | 43,20  | 19,01  | 9,90        |

Fonte: A autora (2019)

Ainda é possível correlacionar os dados de vazão do lixiviado bruto com dados de precipitação obtidos a partir da estação Recife-CURADO/INMET conforme pode ser visto no gráfico 23. No qual é possível observar a influência da precipitação nos eventos de maior produção mensal de lixiviado.

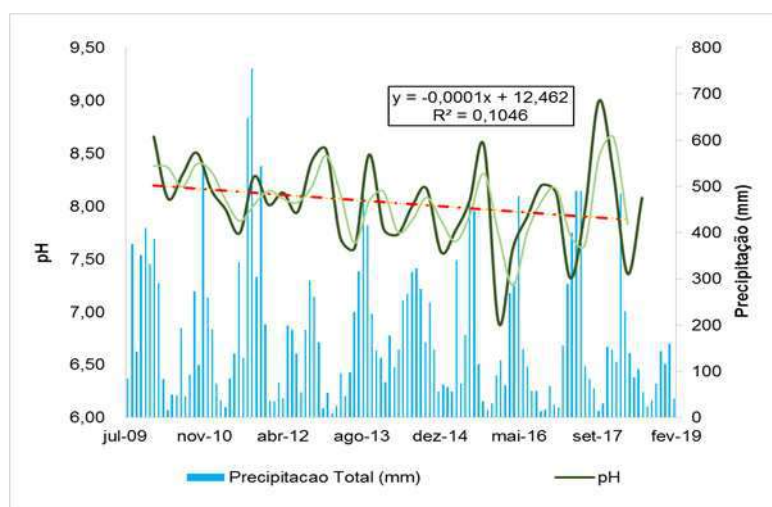
Gráfico 23 – Vazão média Mensal x Precipitação



Fonte: A autora (2019)

A partir do monitoramento qualitativo sabe-se que o pH (gráfico 24) do lixiviado do aterro da Muribeca variou dentre valores de 6,90 – 9,00 nos anos monitorados (2009-2018), tendo um valor médio de 8,10, foi obtido um desvio padrão de 0,46 e coeficiente de variação de 5,68%. A evolução desse parâmetro pós-fechamento do aterro teve pouca variação sendo a média do primeiro ano de encerrado quando comparada ao último ano analisado sofreram uma redução de apenas 5,61%, comportamento esperado, pois segundo BHALLA *et al.* (2013) aterros mantém seu pH em torno de 8 durante a metanogênese.

Gráfico 24 – pH do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

As oscilações entre valores encontrados podem ser correlacionadas com os períodos de chuva e estiagem no local, observa-se a diminuição do Ph em períodos de chuva e aumento em períodos de estiagem em concordância com os resultados obtidos por Lôbo (2006) e Santos Filho (2013).

Lôbo (2006) estudou o lixiviado da Muribeca dos anos de 2004-2005, enquanto ainda havia deposição de resíduos em algumas células do aterro encontrando um pH de 7,3-8,7 com valor médio de 8,14. Já Lins et al (2011) analisou os parâmetros da Muribeca durante os anos de 2007 a 2009 encontrando valores entre 8,21 – 8,70 com valor médio de 8,46. Ainda Santos Filho (2010) que realizou o estudo do lixiviado entre os anos de 2006 a 2013 encontrando valores que variaram entre 6,3 – 8,8.

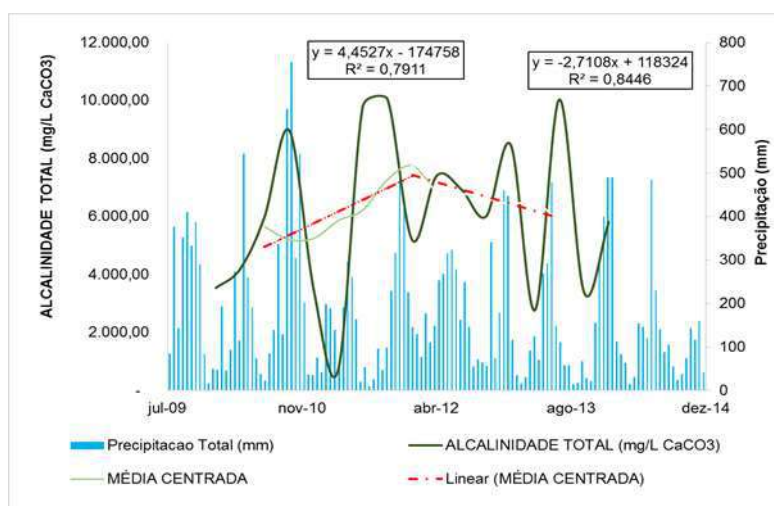
A alcalinidade (gráfico 25) foi monitorada entre os anos de 2009-2014 variando na faixa de 166,70 -24.500,00mg/L. A média de valores encontrada foi de 5.883,53 mg/L, o desvio padrão 4.009,83 mg/L, o coeficiente de variação 68,15%. O pH geralmente aumenta com o tempo, pois formas ácidas iniciais tendem a estados neutralizados, com decréscimo da demanda de oxigênio químico e biológico (MOREIRA, BRAGA, FRIES, 2008). Acrescenta-se que no período observado o parâmetro manteve-se quase constante com um pequeno aumento de 2,56% fato esperado, pois a alcalinidade é responsável pela manutenção do pH, segundo Sivapullaiah (2016) espera-se que esse parâmetro só diminua com a inibição da metanogênese e início da estabilização.

Esse comportamento de pico pode ser comparado ao resultado obtido por Qasim e Chiang (1994, apud LOBO 2006) que ao demonstrar valores de alcalinidade para os parâmetros de lixiviado de aterros em diferentes idades (1, 5 e 16 anos) mostrou um aumento de valores na idade de 5 anos com posterior retomada da tendência de decrescimento. Pohland e Harper (1986) também observam um aumento na alcalinidade durante a fase ácida da decomposição com posterior decréscimo de valores.

Ferreira (2010) ressalta que é esperado que aterros mais jovens tenham maiores valores de alcalinidade, o que resultaria em menores valores para antigos aterros. Para ilustrar essa tendência pode ser feita a comparação dos resultados obtidos com os encontrados por Lôbo (2006) e Lins et al (2011) que foram de 4.719-20.218 mg/L e 5.867 - 8.375 mg/L, respectivamente. Esses resultados são superiores aos obtidos por Santos Filho (2013) que foram de 5000 – 7000 mg/L e aos observados no ano de 2017 que variaram entre 4325-7300 mg/L, comprovando a tendência decrescente esperada para parâmetro.

A relação entre a precipitação e a alcalinidade obtida para um mesmo ano, em períodos chuvosos, tendo em vista o evento de diluição, a alcalinidade tende a diminuir enquanto em épocas de seca esse parâmetro tem resultados maiores resultados condizentes com os obtidos por Santos Filho (2013).

Gráfico 25 – Alcalinidade do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Foram obtidos valores de condutividade (gráfico 26) nos anos de 2009 - 2014 que variaram dentro da faixa de 1,69 - 24,73  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . A média para os valores

encontrados foi de 14,78  $\mu\text{S}/\text{cm}$  com um desvio padrão de 6,91  $\mu\text{S}/\text{cm}$  e um coeficiente de variação de 46,76%. A partir dos resultados pode-se observar a tendência decrescente desse parâmetro que obteve valor médio anual de 16,95  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em 2009 e 12,48  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em 2014, havendo uma redução de 26,38% para os anos monitorados. Essa diminuição é esperada, pois a tendência a pHs alcalinos promove a precipitação dos cátions metálicos maiores responsáveis pela condutividade do efluente (SIVAPULLAIAH, 2016).

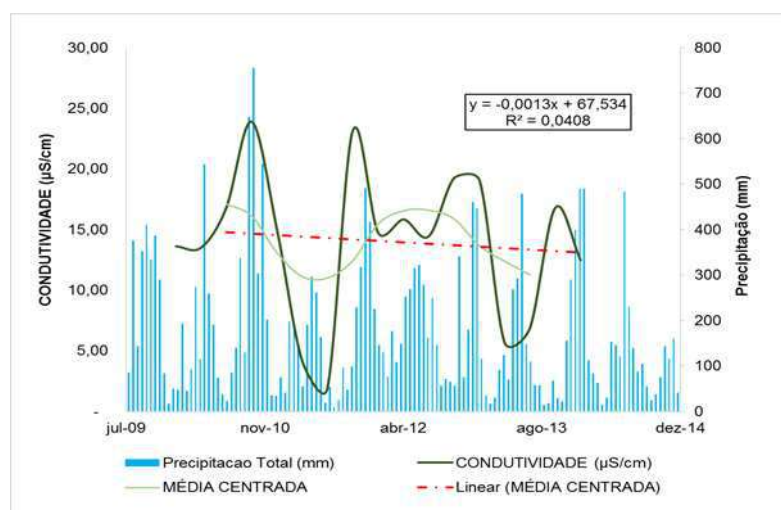
Lôbo (2006) encontrou um valor médio de 18,446  $\mu\text{S}/\text{cm}$  em seu estudo atribuindo as variações de valores encontradas devido à mistura de lixiviados produzidos por resíduos novos e antigos. Ainda como valores de comparação Lins et al (2011) encontrou para o aterro resultados variando entre 18,24-24,23  $\mu\text{S}/\text{cm}$  com um resultado médio de 21,41  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

A diminuição de valores evidenciada no estudo pode ser explicada pelo fato de o aterro estar enquadrado na fase III de estabilização, segundo Cintra et al.(2004). Essa fase é caracterizada por pH mais altos em torno de 8 após a diminuição dos íons carregados na fase ácida do processo.

Ainda pode-se afirmar que, segundo Pohland e Harper (1986), o aterro encontra-se em maturação, estando dentre a faixa de valores de 1,4 – 17,1  $\mu\text{S}/\text{cm}$  principalmente levando-se em conta as medições do ano de 2017 que variaram entre 9,22 – 15,73.

Por fim é possível fazer uma correlação dos resultados com a pluviosidade local em períodos de chuva a condutividade diminui, assim como, em períodos de seca, provavelmente devido a maior concentração de íons, há um aumento desse parâmetro.

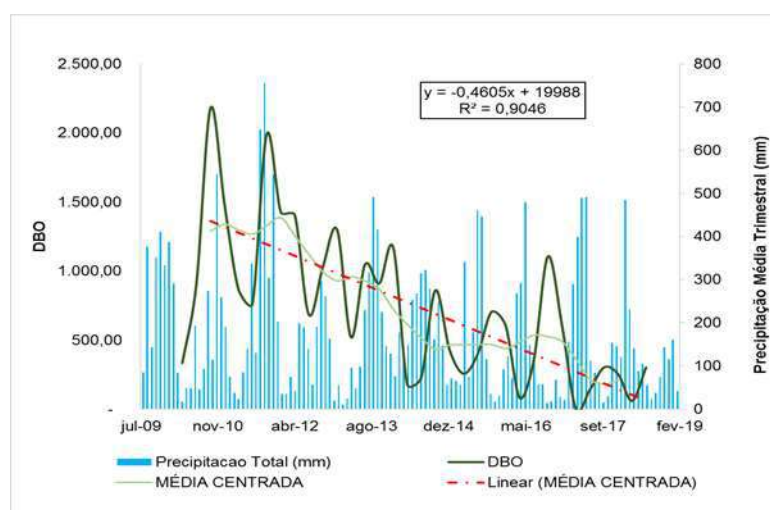
Gráfico 26 – Condutividade do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

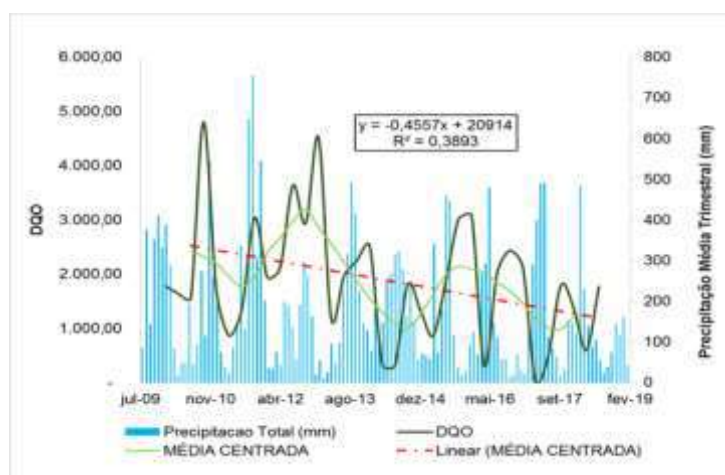
Os valores de DBO (gráfico 27) obtidos em estudo variaram em uma ampla faixa de 2,00 – 2.320,00 mg/L tendo uma média de 891,83 mg/L e desvio padrão de 610,37 mg/L, para os dados coletados o coeficiente de variação foi de 68,44%. Já os resultados para DQO (gráfico 28) variaram dentro da faixa de 42,30 – 6.400,00 mg/L, com uma média de 2.062,10 mg/L, desvio padrão de 1.277,21 mg/L e coeficiente de variação de 61,94 %. Os dados obtidos para a relação DBO/DQO (gráfico 29) variaram entre 0,04 – 1,27, tendo como valor médio 0,49, desvio padrão de 0,27 e coeficiente de variação de 55,99%.

Gráfico 27 – DBO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



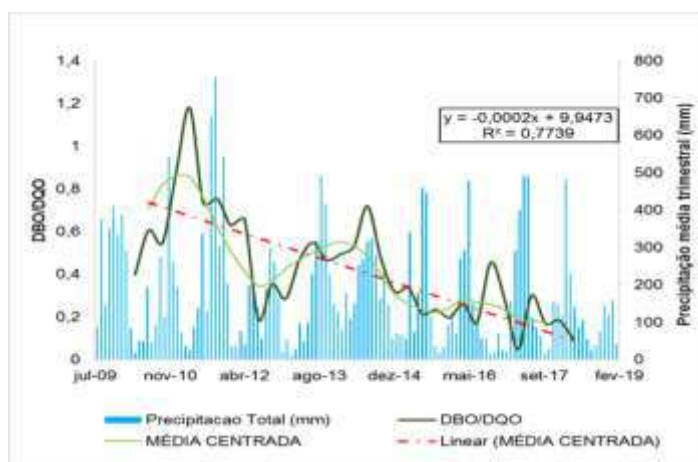
Fonte: A autora (2019)

Gráfico 28 – DQO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Gráfico 29 – Relação DBO/DQO do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

No geral, os três parâmetros acima citados diminuíram de forma visível. As médias anuais para o ano de 2009 foram: 1.482,55 mg/L (DBO), 2.791,90 mg/L (DQO) e 0,60 (DBO/DQO). Já para o ano de 2018: 204,53 (DBO), 1.245,67 (DQO) e 0,15 (DBO/DQO). Com efeito, houve uma redução de 86,20%, 55,38% e 74,60%, para DBO, DQO e relação DBO/DQO, respectivamente. Como demonstrado a estabilização biológica representada pela DBO acontece em menor período quando comparada com a estabilização por processos químicos (DQO), também cabe salientar que a relação DBO/DQO indicativa do potencial de degradabilidade com valores abaixo de 0,4 é um indicativo da diminuição da fração orgânica e fase metanogênica (BHALLA, 2013).

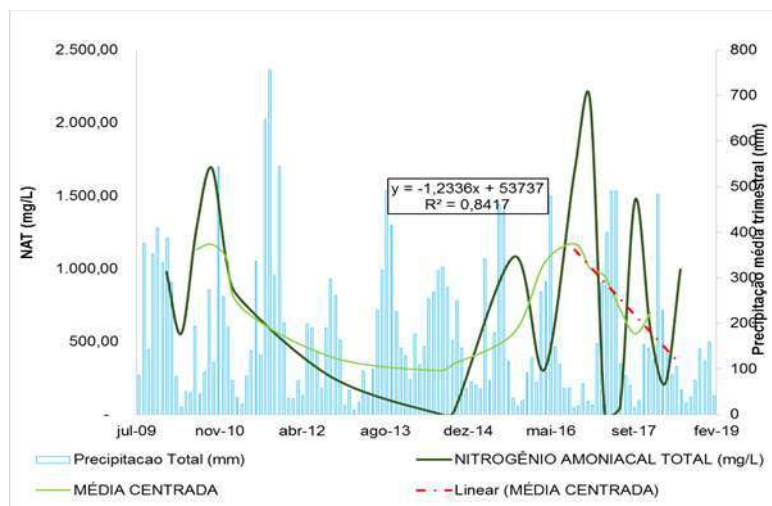
No trabalho de Lobô (2006) foi encontrado para a relação no período de 2004-2005 um valor médio de 0,33, o que evidencia a diminuição desse parâmetro tendo em vista que nesse estudo a média para o ano de 2017 foi de 0,20.

Essa tendência de diminuição pode ser ainda melhor notada quando comparamos os resultados com os obtidos por Lôbo (2006) que variaram para os anos de 2004-2005 entre 138-6.746 mg/L, com valor médio de 1.562mg/L (DBO), a DQO variou entre 1.718-10.097mg/L, com média de 4.302 mg/L e para 0,33 com valor médio para a relação DQO/DBO. Já para os anos de 2007-2009 Lins et al. (2011) encontrou as faixas de valores de 500-3.190 mg/L (DBO), 3.307-4.735mg/L(DQO) e 0,13-0,74 (DBO/DQO).

As oscilações de resultados obtidos em um mesmo ano podem ser associadas com os períodos de chuva e seca, segundo Santos Filho, que estudou os parâmetros de carga orgânica (DBO e DQO) da Muribeca entre os anos de 2002 a 2013, é possível associar um aumento nos resultados obtidos em épocas de seca e diminuição em épocas de maior pluviosidade provavelmente devido à diluição fator esse que pode ser observado no gráfico produzido em estudo.

Os dados de nitrogênio foram acompanhados de 2012 – 2016 nitrogênio total (NT) e de 2009 - 2018 nitrogênio amoniacal total (NAT), o NT (gráfico 30) variou entre 19,00 – 1.890,00 mg/L, com um valor médio de 838,29 mg/L, desvio padrão de 750,52 mg/L e coeficiente de variação de 89,53%. Já o NAT (gráfico 31) possuiu valores entre 2,19 – 2.900,00 mg/L com valor médio de 947,35 mg/L, desvio padrão de 814,17 mg/L e um coeficiente de variação de 85,94 %.

Gráfico 30 – Nitrogênio Amoniacal Total do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Nota-se uma tendência de diminuição dos parâmetros nitrogênio total até 2015 e nitrogênio amoniacal total até 2014 como posterior aumento dos valores encontrados, caracterizando um comportamento gráfico em “U”. Tal comportamento pode ser atribuído, segundo Santos Filho (2013), ao fato que durante a fase ácida da decomposição ocorre uma diminuição desses parâmetros para possibilitar o crescimento microbiano. Após essa etapa, já durante a fase de maturação, o aumento dos parâmetros deve-se a solubilização da matéria orgânica resistente à decomposição, sendo o comportamento do gráfico atribuído a esses fatos.

Quando comparamos os dados do primeiro ano de encerramento onde foram obtidas médias de 1.732,5 mg/L (NT) e 1219,33 mg/L (NAT) com as médias obtidas no último ano de medição 1438,75 mg/L (NT) e 1245,67 mg/L (NAT), concluímos que os parâmetros acima tiveram uma tendência de redução de 16,38% (NT) 50,25% (NAT).

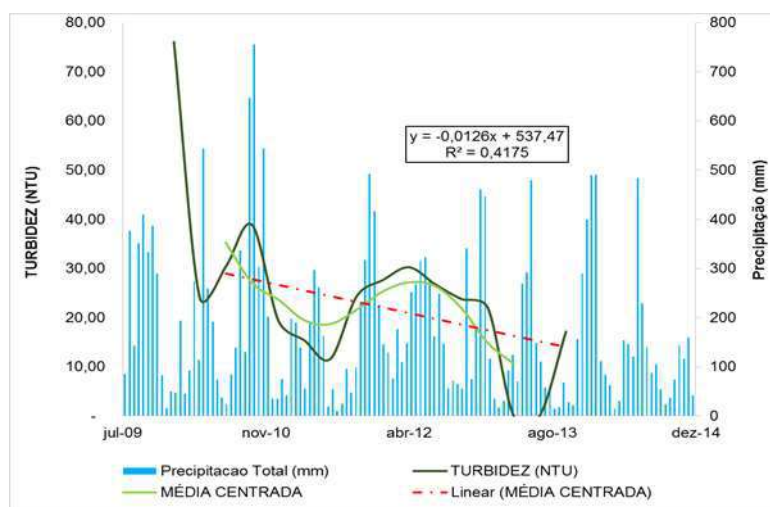
Lopes et al (2018) correlacionam o nitrogênio total e o amoniacal total com o pH e alcalinidade, para os autores quando o pH se encontra na faixa de 4,4 a 8,3 ocorre uma alcalinidade por predominância de bicarbonatos. As reações de produção dos bicarbonatos também são responsáveis pela produção dos compostos nitrogenados havendo correlação entre as concentrações desses fatores.

Lins et al. (2011) monitorou o nitrogênio amoniacal total durante os anos de 2007-2009 encontrando valores na faixa de 1125 – 2900 mg/L, essa faixa de valores coincide com a tendência em “U” demonstrada pela curva da Figura 8.

As variações de valores obtidas para um mesmo ano podem ser atribuídas ao processo de diluição devido aos períodos de chuva, é possível observar um aumento nos valores, tanto de NT como de NAT, nos períodos de seca e diminuição nos períodos de escassez. Tanto NT quando NAT podem enquadrar o lixiviado da Muribeca como sendo obtido da fase de metanogênese segundo Sousa(2009).

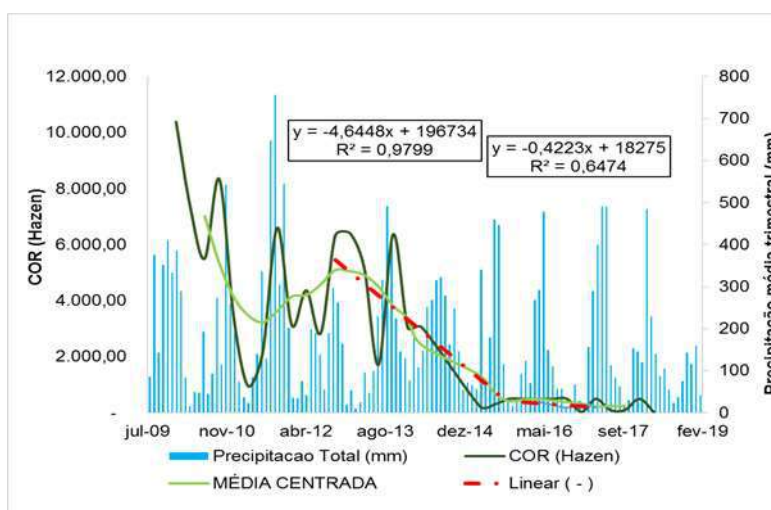
A turbidez (gráfico 31) foi medida entre os anos de 2009 - 2014 onde foram obtidos valores que variaram entre 0,05 - 162,30 NTU, com um valor médio de 37,55 NTU, desvio padrão de 31,97 NTU e coeficiente de variação de 85,14%. Já a cor (gráfico 32) foi medida entre os anos de 2009 - 2018 sendo os valores obtidos na faixa de 35,00 – 18.400,00 Hazen, com valor médio de 4.176,10 Hazen, desvio padrão de 4.053,52 Hazen e coeficiente de variação de 97,06 %.

Gráfico 31 – Turbidez do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Gráfico 32 – Cor do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Os dois parâmetros diminuíram com o passar do tempo, comparando-se a média obtida no primeiro ano de medição a média do último ano aqui em estudo tempo que a cor variou de 10.476,00 para 53,00 Hazen uma redução de 97,98%, já a turbidez variou de 76,60 para 13,67 NTU uma redução de 77,55%. A diminuição dos parâmetros de cor e odor pode ser correlacionada com a biodegradação do aterro segundo Sivapullaiah (2016) a cor e turbidez tem relação com a presença de compostos orgânicos sendo esperado que com o tempo e a diminuição da fração orgânica também haja decréscimo nesses parâmetros.

Santos Filho (2013) monitorou os parâmetros de cor e turbidez para a Muribeca, a cor os anos de 2007 a 2010 variou entre 8000 e 10500 Hazen, esses valores contribuem para a constatação de diminuição do parâmetro tendo em vista que a faixa de valores encontrados para o ano de 2017 variou entre 35 e 500 Hazen.

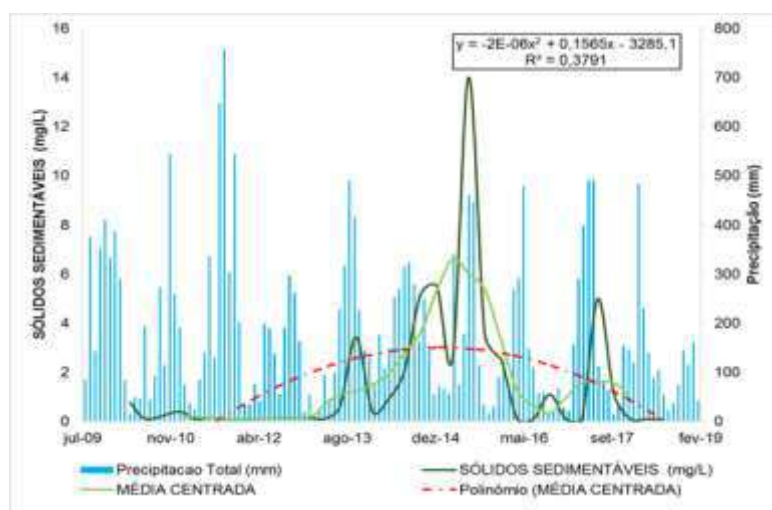
A cor e turbidez sofre influência da precipitação observa-se uma diminuição dos dois parâmetros em épocas chuvosas devido à diluição e aumento em épocas de menor índice pluviométrico.

Os valores encontrados para turbidez no ano de 2017 podem enquadrar o aterro como em fase metanogênica segundo faixa de valores descrita por Sousa(2009).

No tocante aos sólidos sedimentáveis (gráfico 33) observou-se que os valores encontrados variaram de forma inconstante durante o período de 2009 - 2018 sendo encontrados valores entre 0,00-14,00 mg/L com um valor médio de 1,70 mg/L, desvio padrão de 2,78 mg/L e coeficiente de variação de 163,46%. O aumento de valores no período de 2013 - 2016 podemos ser correlacionados com a presença de argila ou areia proveniente do próprio aterro, também podendo esse valor sofrer forte influência da sazonalidade de chuvas. Ao compararmos a média obtida no primeiro ano de medição 0,45 mg/L com a média para o último ano de medição 0,1 mg/L observa-se uma redução geral de 78,13%.

O aumento de valores no período de 2013 a 2016 pode ser correlacionado com a diminuição do pH no mesmo período, uma diminuição no pH ocasiona uma maior dissolução de metais pesados no lixiviado podendo ser uma das causas para o aumento da presença de sólidos sedimentáveis nesse período.

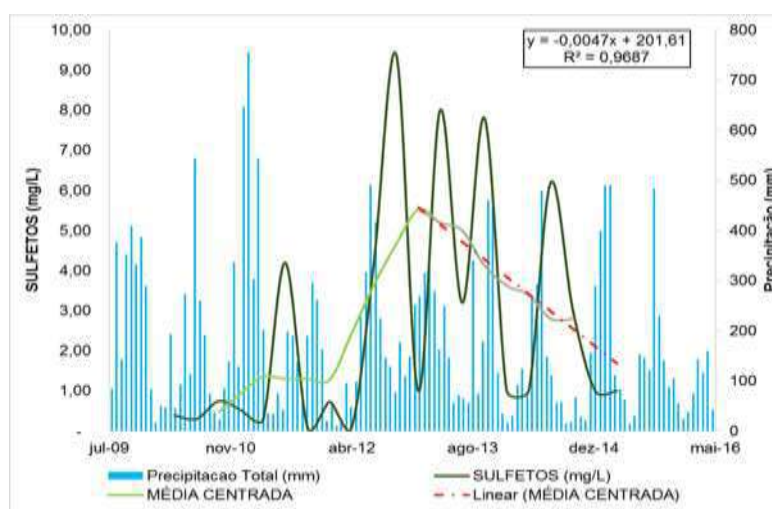
Gráfico 33 – Sólidos Sedimentáveis do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Os sulfetos (gráfico 34) foram medidos entre os anos de 2010 - 2018, não havendo dados pertinentes ao ano de 2012. Os valores encontrados variaram na faixa de 0,10 - 9,40 mg/L, com um valor médio de 1,77 mg/L, desvio padrão de 2,54 mg/L e coeficiente de variação de 143,20%. Também é possível notar um expressivo aumento no período de 2014 - 2016 com posterior diminuição nos dois últimos anos, esse fato pode decorrer do progressivo aumento do pH que tem efeito na diminuição dos sulfetos (SIVAPULLAIAH *et al.*, 2016). No geral os sulfetos tiveram um aumento no período pós encerramento do aterro onde no primeiro ano a média de valores foi de 0,48mg/L e no último ano 1,67mg/L um aumento significativo de 246,42%.

Gráfico 34 – Sulfetos do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

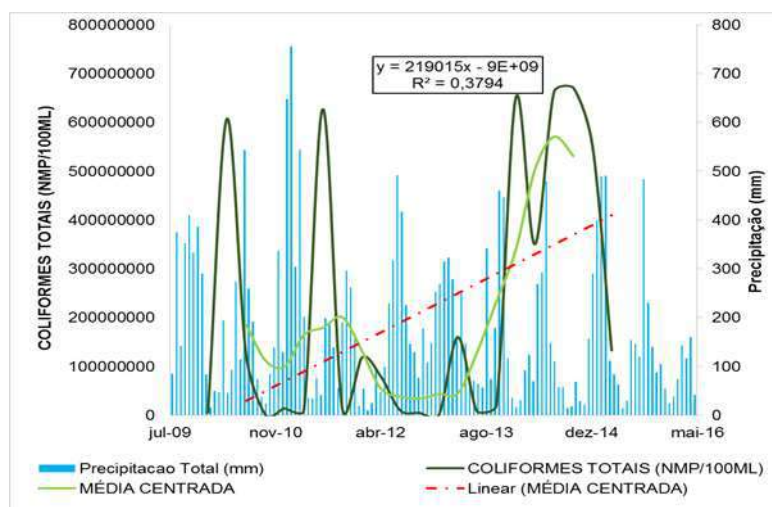
Segundo Ferreira (2010) os sulfetos em conjunto com cloretos, ferro e manganês são responsáveis por acréscimo na DQO, tendo por base os resultados encontrados nesse estudo o aspecto de aumento nos sulfetos pode ser correlacionado com o aumento nos valores de DQO já mencionados.

A faixa de valores encontradas por Lins *et al.* (2011) para a Muribeca nos anos de 2007 a 2009 variou de 0,37 – 1,26 mg/L evidenciando o aumento do parâmetro com o tempo tendo em vista que no ano de 2017 os valores variaram entre 1 – 7,8 mg/L. Esses valores enquadram o lixiviado, quanto ao sulfeto, na fase 3 ou fase ácida segundo Pohland e Harper (1986).

Segundo Silva (2016) a redução, reação química, de sulfatos em sulfetos ocorre devido bactérias redutoras e o aumento gradativo desse componente é esperado devido ao processo de estabilização da massa de resíduos, o aumento da concentração de sulfetos inibe a metanogênese dando início a estabilização.

Os coliformes totais (gráfico 35) foram contados no período de 2009 – 2018 sendo obtidos valores que variaram entre  $4 \times 10^4$  –  $1,6 \times 10^9$  NMP/100mL, com uma média de  $2,5 \times 10^8$  NMP/100mL, desvio padrão de  $4,9 \times 10^8$  NMP/100mL, coeficiente de variação 194,86%, os dados são expressos na a seguir. Quando comparadas as médias do primeiro ano de medição ( $4,6 \times 10^8$  NMP/100mL) com a do último ano medido ( $4,7 \times 10^6$  NMP/100mL) nota-se que houve uma redução de 98,98%.

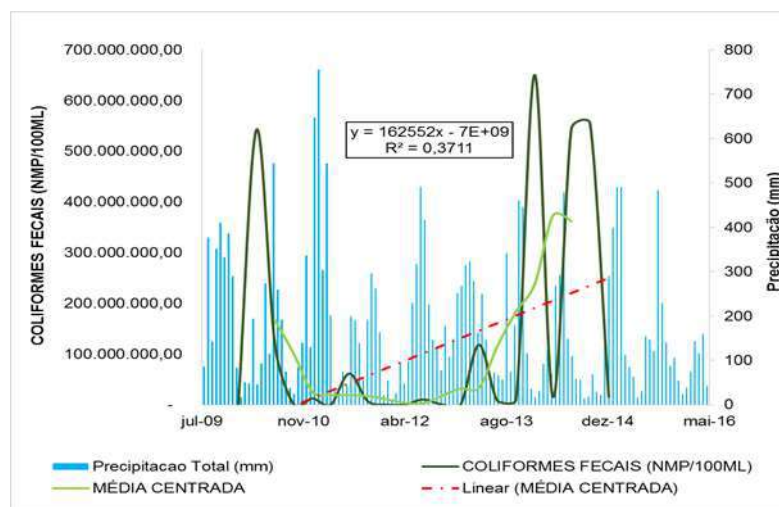
Gráfico 35 – Coliformes Totais do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Os coliformes fecais (gráfico 36) foram contados em igual período sendo obtidos valores que variaram entre  $2 \times 10^4$  -  $1,6 \times 10^9$  NMP/100mL, com uma média de  $1,1 \times 10^8$  NMP/100mL, desvio padrão de  $3,6 \times 10^8$  NMP/100mL, coeficiente de variação 327,12%. Quando comparadas as médias do primeiro ano de medição ( $3,1 \times 10^7$  NMP/100mL) com a do último ano medido ( $1,1 \times 10^5$  NMP/100mL) nota-se que houve uma redução de 99,65%.

Gráfico 36 – Coliformes Fecais do Lixiviado Bruto da Muribeca no tempo.



Fonte: A autora (2019)

Observa-se que a tendência natural para esses microrganismos no passar do tempo é ter sua concentração diminuída ou até ser eliminados, pois devido à seleção natural pode ocorrer a substituição desses microrganismos por outros heterotróficos (FLECK, 2003).

Todos os resultados podem ser observados a seguir na tabela 20 que permite a observação quantitativa das alterações dos parâmetros de monitoramento a longo prazo, do período pós encerramento das atividades do Aterro da Muribeca. Na tabela é possível observar a comparação entre os resultados do primeiro ano pós encerramento e o último ano de medição do parâmetro.

Segundo Lôbo(2006) a medição dos parâmetros de micro-organismos para os anos de 2004 e 2005 variou entre 104 a 108 estando entre a faixa de valores de variação encontrados até 2015. A presença de coliformes no lixiviado classifica o aterro como em fase ácida segundo Pohland e Harper (1986), entretanto Sousa (2009) ao investigar os aterros brasileiros encontrou coliformes em aterros já em metanogênese podendo enquadrar a Muribeca nessa fase para esse autor.

Tabela 20 – Parâmetros do lixiviado: 1 ano pós-encerramento X 9 anos pós-encerramento

| Parâmetros                  | 1 ano após encerramento |                |                |                          | 9 anos após encerramento |              |               |                          | Comportamento<br>(Redução - /<br>Aumento +) |
|-----------------------------|-------------------------|----------------|----------------|--------------------------|--------------------------|--------------|---------------|--------------------------|---------------------------------------------|
|                             | Faixa de valores        | Média          | Desvio Padrão  | Coefficiente de variação | Faixa de valores         | Média        | Desvio Padrão | Coefficiente de variação |                                             |
| CF (NMP/100 mL)             | 20.000 - 1.600.000.000  | 165.498.333,33 | 462.657.626,21 | 279,55%                  | 49.000 - 170.000         | 109.666,67   | 60.500,69     | 55,17%                   | -99,93%                                     |
| COR (Hazen)                 | 3.350 - 14.000          | 8.501,25       | 3.801,54       | 44,72%                   | 35 - 500                 | 211,67       | 251,81        | 118,97%                  | -97,51%                                     |
| CT (NMP/100 mL)             | 40.000 - 1.600.000.000  | 184.423.333,33 | 459.559.734,04 | 249,19%                  | 70.000 - 14.000.000      | 4.726.666,67 | 8.030.967,15  | 169,91%                  | -97,44%                                     |
| Sólidos Sedimentares (mg/L) | 0,1 - 1,5               | 0,60           | 0,64           | 106,28%                  | 0,1                      | 0,10         | 0,00          | 0,00%                    | -83,33%                                     |
| DBO (mg/L)                  | 500 - 2320              | 841,43         | 745,71         | 88,62%                   | 60,3 - 301,8             | 204,53       | 127,42        | 62,30%                   | -75,69%                                     |
| DBO/DQO                     | 0,04 - 0,84             | 0,51           | 0,27           | 53,83%                   | 0,1 - 0,18               | 0,15         | 0,04          | 29,45%                   | -70,16%                                     |
| Turbidez (UNT)**            | 5,02 - 106,7            | 42,35          | 30,64          | 72,35%                   | 13,67 - 20,72            | 17,20        | 4,99          | 28,99%                   | -59,40%                                     |
| NAT (mg/L)                  | 90 - 2365               | 1.219,33       | 727,42         | 59,66%                   | 215,2 - 995              | 596,40       | 390,19        | 65,42%                   | -51,09%                                     |
| DQO (mg/L)                  | 359 - 6400              | 2.503,82       | 1.761,68       | 70,36%                   | 100 - 2180               | 1.245,67     | 594,47        | 47,72%                   | -50,25%                                     |
| Condutividade (µS/cm)**     | 2,97 - 24,595           | 16,95          | 6,42           | 37,86%                   | 9,22 - 15,73             | 12,48        | 4,61          | 36,92%                   | -26,38%                                     |
| NT (mg/L)*                  | 1575 - 1890             | 1.732,50       | 222,74         | 12,86%                   | 290 - 1835               | 1.448,75     | 772,50        | 53,32%                   | -16,38%                                     |
| pH                          | 7,66 - 8,92             | 8,38           | 0,31           | 3,75%                    | 7,36 - 8,3               | 7,91         | 0,49          | 6,21%                    | -5,61%                                      |
| Alcalinidade (mg/L)**       | 575 - 8375              | 5.667,30       | 2.947,05       | 52,00%                   | 4325 - 7300              | 5.812,50     | 2.103,64      | 36,19%                   | 2,56%                                       |
| SULFETOS (mg/L)             | 0,14 - 0,9              | 0,48           | 0,26           | 53,19%                   | 1,0 - 3,0                | 1,67         | 1,15          | 69,28%                   | 246,42%                                     |

Fonte: A autora (2019)

#### 4.4 ANÁLISE PARAMÉTRICA DO LIXIVIADO

Uma análise conjunta dos resultados permite observar que no decorrer de 9 anos de monitoramento os parâmetros biológicos de contagem de microrganismos e a cor foram os que mais descaíram com o tempo totalizando reduções maiores que 90%. Os parâmetros DBO, DBO/DQO e turbidez também tiveram quedas expressivas acima de 70%, seguidos DQO e nitrogênio amoniacal com diminuições acima de 50%. pH e alcalinidade tiveram pouca variação no período estudado. Apenas os sulfetos tiveram um aumento considerável com o tempo.

Uma correlação das faixas de valores obtidas no último ano de monitoramento (2018) nos permite enquadrar o aterro como em fase metanogênica segundo Pohland e Harper (1986), Kjedsenetall (2002) e Sousa (2009). É importante salientar que a decomposição dividida em etapas é uma idealização teórica pode haver sobreposição de etapas, omissão de fase e até cessação temporária do processo em campo.

A tabela abaixo demonstra faixa de valores para aterros encerrados encontradas na literatura e as faixas obtidas no último ano de monitoramento desse trabalho.

Tabela 21 – Faixa típica de valores para lixiviado em aterros antigos

| Parâmetro                         | Faixa de valores por autor    |                          |                             |                         |                              |                                     |
|-----------------------------------|-------------------------------|--------------------------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|-------------------------------------|
|                                   | Frank e Tchobanoglous (2002). | Lee <i>et al.</i> (2010) | Fuziah <i>et al.</i> (2013) | Bhalla (2013).          | Naveen <i>et al.</i> (2016). | GRS - UFPE                          |
|                                   | Resíduos antigos (>10anos)    | Aterro Maduro            | Aterro Sanitário Encerrado  | Aterro Antigo (>10anos) | Aterro Antigo                | Aterro encerrado (9 anos)           |
| DBO5 (mg/l)                       | 100–200                       | 61,90-870,00             | 3.500,00                    | 50-100                  | 40                           | 60,30-301,80                        |
| DQO (mg/l)                        | 80–160                        | 409,00-1510,00           | 10.230,00                   | <4000                   | 498                          | 599,20-1768,80                      |
| DBO/DQO                           |                               | 0,05-0,57                |                             | <0,1                    |                              | 0,10-0,18                           |
| Sólidos em suspensão total (mg/L) | 100–400                       |                          |                             |                         |                              | 0,1                                 |
| Nitrogênio orgânico (mg/L)        | 80–120                        |                          |                             |                         |                              | 290-2835*                           |
| Nitrogênio Amoniacal (mg/l)       | 20–40                         | 78,50-523,00             |                             |                         |                              | 215,20-995                          |
| Alcalinidade (mg/l)               | 200–1000                      |                          |                             |                         |                              | 4325-7300**                         |
| pH                                | 6.6–7.5                       | 6,27-7,38                | 8,2                         | >7,5                    | 7.38                         | 7,36-8,3                            |
| Condutividade (µS/cm)             |                               |                          |                             |                         | 2750                         | 9,21-15,73**                        |
| Turbidez (NTU)                    |                               |                          |                             |                         | 470                          | 13,67-20,72**                       |
| CT (NMP/100 mL)                   |                               |                          |                             |                         |                              | $7 \times 10^4 - 1,4 \times 10^7$   |
| CF (NMP/100 mL)                   |                               |                          |                             |                         |                              | $4,9 \times 10^4 - 1,7 \times 10^5$ |
| COR (Hazen)                       |                               |                          |                             |                         |                              | 35-500                              |
| SULFETOS (mg/L)                   |                               |                          |                             |                         |                              | 1,0-3,0                             |

\* Dados de 2012-2016 \*\*Dados de 2009-2014

Fonte: A autora (2019)

Em suma a exceção do Nitrogênio orgânico que foi monitorado por 5 anos e Alcalinidade, Turbidez e Condutividade que tiveram medições realizadas por um período de 6 anos, os demais foram monitorados por 9 anos.

#### 4.4.1 Análise das tendências dos parâmetros de lixiviado

A decomposição clássica de séries temporais por meio de médias móveis foi aplicada aos parâmetros de lixiviado para observar a possibilidade de análise da tendência dos mesmos e a adequação desse método estatístico aos valores monitorados.

O estudo da decomposição clássica foi realizado em 13 dos parâmetros de lixiviado apresentados. Desses apenas 5 puderam ter sua tendência analisada pelo modelo proposto.

A alcalinidade apresentou duas retas de tendência visíveis e possíveis de se adequar ao modelo de regressão linear da média centrada, sendo que a tendência dos últimos dois anos apresenta uma regressão.

Os dados de DBO tem tendência regressiva também se adequando ao modelo com uma aderência superior a 90%, assim como a biodegradabilidade (DBO/DQO) que tem sua tendência representada por uma reta decrescente com aderência de 77%.

O parâmetro de cor teve uma tendência de regressão mais angular nos primeiros anos, sendo esse comportamento regressivo continuado, entretanto com menor angulação. A tendência dos últimos dois anos do monitoramento dos sulfetos pôde ser enquadrada ao modelo com uma aderência de 96,8%.

Em suma o modelo de decomposição clássica não se adequou a todos os parâmetros, entretanto trata-se de uma ferramenta a ser validada para estimativa de tempo de estabilização dos parâmetros que se adequaram a ele.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA NOVAS PESQUISAS

A partir da análise dos dados obtidos e da metodologia de pesquisa utilizada, chegou-se a algumas conclusões. Todavia, não se encerra aqui a discussão sobre o tema, podendo assim, a partir deste trabalho, emergirem novos estudos, como proposto a seguir.

### 5.1 CONCLUSÕES

O presente estudo evidenciou a influência do tempo nos parâmetros ambientais de um aterro encerrado monitorado por longo período. Os resultados de recalque permitem compreender que os movimentos mecânicos ainda existentes no aterro são devidos apenas a decomposição de fração putrescível, com deformações específicas variando entre 1-8%.

A eficiência da camada final de cobertura pode ser atestada pela diminuição da vazão média mensal de lixiviado bruto, quando comparados mesmos períodos de 2009 e 2013, houve uma redução de 69%, evidenciando a capacidade da mesma em diminuir a infiltração. Também é compreendido que a mesma atua impedindo ou minimizando as emissões de biogás, tendo em vista que desde o ano de 2016 não são detectadas emissões através da camada de cobertura mesmo havendo produção de biogás como pode ser visto pelo fluxo nos drenos.

A impermeabilização promovida pela camada de cobertura gera aumento considerável do fluxo de biogás pelos drenos como é possível notar com o aumento considerável ocorrido no ano de 2012 após melhorias na cobertura. Pode-se dizer que a camada de cobertura promove a diminuição das emissões de biogás redirecionando para os drenos onde através da queima o metano é convertido em dióxido de carbono que é menos nocivo a atmosfera.

O fluxo de biogás pelos drenos tem tendência a redução, entretanto, os baixos coeficientes angulares encontrados no estudo de tendência apontam que o aterro ainda produzirá gases por longo período de tempo, estando o mesmo em fase metanogênica.

Quando comparado à influência da precipitação nos resultados de vazão observa-se que o fluxo apresenta picos nas estações de chuva e diminuições nas épocas de menor pluviometria. Costa et al. (2018) relata que o aumento da umidade

em camadas de cobertura, simulando situações de chuva, melhora a eficiência da mesma, tal fato pode diminuir as emissões pela camada e acrescentar volume de gás aos drenos do aterro.

A análise qualitativa do lixiviado bruto da Muribeca permite concluir que os parâmetros biológicos de contagem de microrganismos e a cor são os que mais variam com o tempo totalizando reduções maiores que 90%. Os parâmetros DBO, DBO/DQO e turbidez também tiveram quedas expressivas acima de 70%, seguidos DQO e nitrogênio amoniacal com diminuições acima de 50%.

O pH e alcalinidade tiveram pouca variação no período estudado caracterizando a manutenção de fase metanogênica no aterro. Apenas os sulfetos tiveram um aumento considerável com o tempo o que pode ser correlacionado com a inibição dos microrganismos que foram um dos fatores com maior decaimento no estudo.

A análise de tendência dos parâmetros de gás se mostrou adequada em 66,66% dos casos estudados, entretanto o modelo só se adequou para a análise de 5 dentre os 13 parâmetros de lixiviado. Essa ferramenta estatística se mostrou interessante para futuros estudos de auxílio a previsão de estabilização de parâmetros tanto de gás como de lixiviado.

Depreende-se da análise dos resultados que mesmo após nove anos do encerramento o aterro da Muribeca ainda gera passivos ambientais, sendo, portanto necessário à continuação do acompanhamento e manutenção do local.

## 5.2 PERSPECTIVAS FUTURAS

Diante dos resultados encontrados em pesquisa sugere-se para trabalhos futuros:

- Mapeamento infravermelho de emissões superficiais no aterro;
- Investigação e contagem da presença de microrganismos metanotróficos na camada de cobertura local;
- Investigação detalhada dos metais pesados presentes no lixiviado;
- Aplicação de modelos de previsão estatística para estimativa de tempo necessário para total estabilização do passivo ambiental gerado no local.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, I. R.; COLUNA, I. M. E.. **Emissões do Setor de Resíduos 2018**. World Resources Institute Brasil, 2018. Disponível em: <http://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2018/06/Relatorios-SEEG-2018-Residuos-FINAL-v2.pdf>. Acesso em: 27 nov. 2018.
- ALCANTARA, Perboyre Barbosa; JUCÁ, José Fernando Thomé. Recalque em Aterros: Influência da Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos, do Clima e da Biodegradação. **Geotecnia**, São Paulo, n. 118, mar. 2010. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/260571544>. Acesso em: 23 ago. 2018.
- ALVES, A. K. **Proposta de Manual Técnico de Medidas Preventivas e Corretivas para Aterros Sanitários Encerrados**. Dissertação de Mestrado - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Federal de Uberlândia, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8849** - Apresentação de projetos de aterros controlados de resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro, 1997.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10703/89** - Degradação do solo. Rio de Janeiro, 1989.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13896** - Aterros de resíduos não perigosos - Critérios para projeto, implantação e operação Referências. Rio de Janeiro, 1987.
- BAGCHI, Amalendu; BHATTACHARYA, Abhik. Post-closure care of engineered municipal solid waste landfills. **Waste Management & Research**, [s.l.], v. 33, n. 3, p. 232-240, 2015.
- BATEMAN, Julie ; SCHATZ, Sierra. **Monitoring of waste degradation processes for sustainable MSW landfills**. Geoengineer. Disponível em: <https://www.geoengineer.org/education/web-based-class-projects/geoenvironmental-engineering/monitoring-of-waste-degradation-processes-for-sustainable-msw-landfills?showall=1&limitstart=>. Acesso em: 22 jun. 2018.
- BHALLA, B.; SAINI, M. S.; JHA, M. K. Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, [s.l.], v. 2, n. 8, p. 223-232, 2013.
- BOCCHIGLIERI, M. M. **A Influência do Recebimento de Chorume dos Aterros Sanitários da Região Metropolitana de São Paulo nas Estações de Tratamento de Esgotos do Sistema Integrado**. Dissertação de Mestrado – Faculdade de Saúde Pública da USP. São Paulo, 2005.
- BORGES, T. M.; VIMIEIRO, G. V.; CATAPRETA, C. A. A.. Guia para Monitoramento Ambiental em Aterros Sanitários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016. Campina Grande, PB. **Anais...** Curitiba: Ibeas – Instituto

Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/III-083.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2019.

BOSCOV, Maria Eugênia Gimenez. **Geotecnia ambiental**. São Paulo: Oficina de textos, 2008.

BRASIL. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017**. Disponível em: [abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama\\_abrelpe\\_2017.pdf](http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf). Acesso em: 19 nov. 2018.

CAMPOS, Fábio. **Lixiviado de aterro sanitário, impactos e alternativas de tratamento**. Revista TAE, 2011. Disponível em: <http://www.revistatae.com.br/3356-noticias>. Acesso em: 10 fev. 2018.

CATAPRETA, C. A. A.; SIMÕES, G. F.; Monitoramento Ambiental e Geotécnico de Aterros Sanitários. *In*: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 7., 2016. Campina Grande, PB. **Anais...** Campina Grande, PB: Ibeas – Instituto Brasileiro de Estudos Ambientais, 2016. Disponível em: <https://www.ibeas.org.br/congresso/Trabalhos2016/III-081.pdf>. Acesso em: 08 jul. 2019.

CHU, Lee Man. Landfill Aftercare and Maintenance. *In*: ARCE. **Sustainable Solid Waste Management**. Reston: ARCE, 2016. p. 633-652.

CINTRA, Ilka et al. Avaliação das fases de estabilização de resíduos sólidos urbanos no processo de digestão anaeróbia com recirculação de chorume cru e chorume inoculado. *In*: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental (AIDIS), 29., 2004. San Juan, **Anais...** San Juan: [s.n], 2004. v. 1. p. 1-4.

COSTA, C.M.C. **Avaliação da fissuração por ressecamento em camadas de cobertura de aterros sanitários utilizando materiais alternativos**. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-108/15 – Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília-DF, 2015.

DENARDIN, G. P. **Estudo dos recalques do aterro sanitário da central de resíduos do recreio – Minas do Leão/RS**. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria-RS, 2013.

ESPINACE, R. A et al. Asentamientos en un vertedero controlado a escala con recirculacion de liquidos lixiviados. *In*: Congreso Chileno de Ingeniería Geotécnica, 4., 1997. Santiago, **Anais...** Santiago: Universidad de Valparaíso, 1997. Disponível em: [https://www.academia.edu/18400804/ASENTAMIENTOS\\_EN\\_UN\\_VERTEDERO\\_CONTROLADO\\_A\\_ESCALA\\_CON\\_RECIRCULACION\\_DE\\_LIQUIDOS\\_LIXIVIADOS](https://www.academia.edu/18400804/ASENTAMIENTOS_EN_UN_VERTEDERO_CONTROLADO_A_ESCALA_CON_RECIRCULACION_DE_LIQUIDOS_LIXIVIADOS). Acesso em: 10 fev. 2019.

FEAM – FUNDAÇÃO ESTADUAL DO MEIO AMBIENTE. [on line]. Brasil, 2010. Disponível em: <[www.feam.com.br](http://www.feam.com.br)> Acesso em: 13 fev. 2018.

FEI, X.; ZEKOS, D. Factors influencing long-term settlement of municipal solid waste in laboratory bioreactor landfill simulators. **Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste**, [s.l.], v. 17, n. 4, p. 259-271, 2012.

FERREIRA, A. G. **Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos-SP por meio da caracterização físico-química**. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010.

FLECK, E. **Sistema integrado por filtro anaeróbio, filtro biológico de baixa taxa e banhado construído aplicado ao tratamento de lixiviado de aterro sanitário**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2003.

FRANK, K.; TCHOBANOGLOUS, G. **Handbook of solid waste management**. United of America: McGraw Hill Inc, 2002.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). Diagnóstico dos resíduos sólidos urbanos: relatório de pesquisa. 2012.

JUCÁ, J. F. T.; Disposição final dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. *In*: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental (REGEO), 5., 2003. Porto Alegre, RS. **Anais...** 2003. Porto Alegre, RS: [s.n.], 2003.

JUCÁ, J. F. T.; MARIANO, M. O. H. e MELO, V. L. A. Recalques e decomposição da matéria orgânica em aterros de resíduos sólidos na região metropolitana do Recife. *In*: Congresso brasileiro de engenharia sanitária e ambiental, 20., 1999. Porto Alegre-RS, **Anais...** 1999. Porto Alegre-RS:[ s.n.], 1999.

KJEDSEN, P. *et al.* Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, [s.l.], v. 32, n. 4, p. 297-336, 2002.

LEE, U.; HAN, J.; WANG, M.I. Evaluation of landfill gas emissions from municipal solid waste landfills for the life-cycle analysis of waste-to-energy pathways. **Journal of cleaner production**, [s.l.], v. 166, p. 335-342, 2017.

LINS, E. A.M. **A utilização da capacidade de campo na estimativa do percolado gerado no aterro da Muribeca**. Dissertação de Mestrado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2003.

LINS, E. A.M. **Proposição e avaliação de um sistema experimental de processos físicos e químicos para tratamento de lixiviado**. Tese de doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2011.

LINS, E. A. M.; LINS, C. M. M. S.; JUCÁ, J. F. T.; ALVES, M. C. M.; PALHA, M. L. A. P. F. Estudo das características do lixiviado do aterro da Muribeca antes e após o encerramento. *In*: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 26., 2011. Porto Alegre-RS, **Anais...** 2011. Porto Alegre-RS: [s.n.], 2011.

LINS, E. A. M.; LINS, C. M. M. S.; BRITO, A. R.; BRITO, E. P. L.; SOUZA, N. N. Encerramento e recuperação do aterro de resíduos sólidos urbanos da Muribeca. *In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 26., 2011. Porto Alegre-RS, **Anais...** 2011. Porto Alegre-RS: [s.n.], 2011.

LÔBO, E.M.P.S. **Estudo comparativo das características dos líquidos percolados gerados no Aterro Metropolitano–PB e no Aterro da Muribeca–PE.** Tese de Doutorado. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). Recife-PE, 2006. 127 p.

MACIEL, F. J. **Estudo da geração, percolação e emissão de gases no aterro de resíduos sólidos da Muribeca/PE.** Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2003.

MARIANO, M. O. H. **Estudo dos Recalques no Aterro da Muribeca.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 1999.

MCDUGALL, J. R. et al. Estimating degradation-related settlement in two landfill-reclaimed soils by sand-salt analogues. **Waste Management**, [s.l.], v. 77, p.294-303, jul. 2018. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.013>.

MELO, M. C. **Uma análise de recalques associada a biodegradação no aterro de resíduos sólidos da Muribeca.** Dissertação (Mestrado) – CTG Engenharia Civil, Universidade Federal do Pernambuco. Recife-PE, 2003.

MELO, M. C. et al. Settlement behavior of municipal solid waste due to internal and external environmental factors in a lysimeter. **Journal of Environmental Science and Health**, Part A, v. 51, n. 14, p. 1205-1215, 2016.

MINAS GERAIS. Fundação Estadual do Meio Ambiente; Fundação Israel Pinheiro. **Reabilitação de áreas degradadas por resíduos sólidos urbanos.** Belo Horizonte: FEAM, 2010.

MONTEIRO, V.E.D. **Análises físicas, químicas e biológicas no estudo do comportamento do aterro da Muribeca.** Tese de doutorado – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2003.

MOREDA, I. L. “El Asentamiento em um Relleno Sanitario y su Relación com la Biodegradación”. *In: Congresso Interamericano de Ingeniería sanitaria y Ambiental*, 27., 2000. Porto Alegre-RS, **Anais...** 2000. Porto Alegre-RS: [s.n.], 2000.

NAVEENI, B.P.; SIVAPULLAIAH, P.V E SITHARAMIII T. G. Effect of aging on the leachate characteristics from municipal solid waste landfill. *In: Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 15., 2016. [S.l.], **Anais...** 2016. [S.l: s.n.], 2016.

NIKIEMA, J., BRZEZINSKI, R., & HEITZ, M. Elimination of methane generated from landfills by biofiltration: a review. **Reviews in Environmental Science and**

**Bio/Technology**, [s.l.], v. 6, n. 4, p. 261-284, 2007. DOI:10.1007/s11157-006-9114-Z.

OBLADEN, N. L.; OBLADEN, N. T.; BARROS, K. R.; (2009). **Guia para elaboração de aterros sanitários para resíduos sólidos urbanos**. Publicação do CREA-PR. Dezembro de 2009.

OLIVEIRA, L. R. G. **Estudo das emissões de biogás em camadas de coberturas de aterro de resíduos sólidos urbanos**. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2013.

ONAY, T.T., POHLAND F.G. In situ nitrogen management in controlled bioreactor landfills. **Water Research**, [s.l.], v. 32, n. 5, p. 1383-1392, 1998.

PAULINO, P. M. S. **Avaliação do processo de coagulação/floculação seguido de radiação gama para tratamento de lixiviados**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco. Recife-PE, 2011.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. **Qualidade das Águas e Poluição: Aspectos Físico-Químicos**. 1. ed. São Paulo/SP: ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005. v. 1. 285 p.

POHLAND, F.G. & HARPER, S.R. (1986) Critical review and summary of leachate and gas productions from landfills. EPA/600/2-87/73. Cincinnati, USA.

QUADROS, A.; AUDIBERT, J. L.; FERNANDES, F. Decaimento das emissões de biogás após um ano do encerramento de um aterro controlado de uma cidade de 500.000 habitantes. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, [s.l.], v. 39, n. 1, p. 61-68, 2018.

RECESA, Rede de Capacitação. **Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental. Transversal: Saneamento Básico Integrado às Comunidades Rurais e Populações Tradicionais**. Guia do Profissional em Treinamento. Nível, v. 2, 2008.

REDDY, Krishna R.; KUMAR, Girish; GIRI, Rajiv K. Influence of dynamic coupled hydro-bio-mechanical processes on response of municipal solid waste and liner system in bioreactor landfills. **Waste management**, [s.l.], v. 63, p. 143-160, 2017.

SANTOS FILHO, D. A. **Avaliação Temporal do Lixiviado da Muribeca**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Pernambuco. Recife-PE, 2013. 103 p.

SCHUELER, A.; MAHLER, C. **Sistema de avaliação para classificar áreas de disposição de resíduos sólidos urbanos visando a remediação e a pós-ocupação**. Engenharia Sanitária e Ambiental, 2007.

SOUTO, G.D.B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros - estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar (“stripping”)**. Tese

(Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009. 371 p.

SOWERS, G. F. Settlement of waste disposal fills. In: eighth international conference on soil mechanics and foundation engineering. Moscow, 1993. 978 p. TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. Integrated solid waste management: engineering principles and management issues. **Irwin**: MacGraw-Hill, 1993.

XIE, Y.; XUE, J. e GNANENDRAN, C. T.; Model Uncertainties in Long-Term Settlement Prediction of Landfill Waste. **Springer Nature Singapore** Pte Ltd. 2019. L. Zhan et al. (Eds.): ICEG 2018, ESE, pp. 127–134, 2019. [https://doi.org/10.1007/978-981-13-2224-2\\_16](https://doi.org/10.1007/978-981-13-2224-2_16)

ZVEIBIL, V. Z. (coord). **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001. Disponível em: <http://www.web-resol.org/cartilha4/manual.pdf>. Acesso em: 20 fev. 2018.

## APÊNDICE A – ESTADO DA ARTE DO TEMA

| Autor (es)              | Título                                                                                                                                       | Objetivos                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Abichou et al. (2015)   | Leachate Quality Monitoring from Conventional, Retrofit, and Bio-Reactor Landfill Cells                                                      | Apresenta variação da composição de lixiviados provenientes de aterros convencionais e com recirculação de Lixiviado.                                                                                                                                                                                                                                      |
| ABNT(2010)              | Resíduos sólidos urbanos – Aterros sanitários de pequeno porte – Diretrizes para localização, projeto, implantação, operação e encerramento. | Apresenta normativos básicos sobre encerramento de aterros de pequeno porte.                                                                                                                                                                                                                                                                               |
| Abrelpe (2017)          | Roteiro para Encerramento de Lixões                                                                                                          | Apresenta medidas básicas para procedimento de encerramento de lixões.                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| ALCANTARA E JUCÁ (2010) | RECALQUE EM ATERROS: INFLUÊNCIA DA COMPOSIÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS, DO CLIMA E DA BIODEGRADAÇÃO                                      | Este trabalho aborda a evolução dos recalques em aterros experimentais considerando-se a influência de condições climáticas, a composição dos resíduos sólidos urbanos e a evolução do processo de biodegradação.                                                                                                                                          |
| ALEYA et al. (2019)     | Proposed changes for post-closure monitoring of Etueffont landfill (France) from a 9-year survey.                                            | Verificar se as medidas tomadas em relação à vigilância e controle de lixiviados, águas superficiais e subterrâneas originadas de aterros fechados na França são suficientes assegurar um monitoramento ambiental confiável a longo prazo. Este estudo baseia-se nos primeiros nove anos do Fase de pós-fechamento do aterro de Etueffont, de 2002 a 2010. |
| Alves(2010)             | Proposta de Manual Técnico de medida preventiva e corretivas para Aterro Sanitários Encerrados                                               | Levantar os principais problemas correntes em aterros sanitários encerrados e, a partir disso, elaborar um Manual Técnico de Medidas Preventivas e Corretivas para Aterros Sanitários Encerrados.                                                                                                                                                          |

|                                     |                                                                                                                                              |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| ARAÚJO (2013)                       | ANÁLISE DA GERAÇÃO DE LIXIVIADO EM UM ATERRO ENCERRADO.                                                                                      | Descrever os aspectos qualitativos e quantitativos do lixiviado gerado no aterro encerrado da Muribeca. Estimar o tempo de cuidados e monitoramento pós encerramento de dois grandes aterros através de dados de monitoramento de campo.                                         |
| BAGCHI e BHATTACHARYA (2015)        | Post-closure care of engineered municipal solid waste landfills.                                                                             | Identificar as melhores técnicas de monitoramento geotécnico e desenvolver diretrizes para inspeção e ações emergenciais que possam ajudar aos técnicos e operadores de aterros sanitários a projetar, operar, monitorar, inspecionar e manter o controle em situações extremas. |
| Batista(2010)                       | Desenvolvimento de diretrizes para monitoramento geotécnico e plano de contingência/emergência em aterros sanitários                         | Discutir o efeito da idade e variações sazonais nas características de lixiviados gerados a partir do lixiviado aterro de resíduos (MSW) da cidade de Ludhiana, Punjab (Índia).                                                                                                  |
| BHALLA, SAINI e JHA (2013)          | Effect of age and seasonal variations on leachate characteristics of municipal solid waste landfill.                                         | descrever os principais monitoramentos ambientais e geotécnicos que devem ser executados em aterros sanitários, por meio de um guia orientativo para a execução desses monitoramentos.                                                                                           |
| BORGES, VIMIEIRO E CATAPRETA (2016) | GUIA PARA MONITORAMENTO AMBIENTAL EM ATERROS SANITÁRIOS                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Bortolin e Filho (2010)             | Método da eletrorresistividade aplicado no monitoramento temporal da pluma de contaminação em área de disposição de resíduos sólidos urbanos | Apresentar os resultados do monitoramento temporal da pluma de contaminação por meio do método da eletrorresistividade nos anos de 1999 e 2008.                                                                                                                                  |

|                                     |                                                                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|-------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Catapreta e Simões (2016)           | Monitoramento ambiental e geotécnico de aterros sanitários                                                                                                                                         | Apresentar os objetivos, atividades e diretrizes gerais dos monitoramentos ambiental, operacional e geotécnico executados em aterros sanitários, assim como a experiência desenvolvida em um aterro sanitário.<br>Para esse trabalho realizou-se o levantamento dos aterros sanitários em operação e encerrados no período de 1998 a 2012 na Região Metropolitana de São Paulo, bem como da geração de lixiviados durante o mesmo período. A partir dessas informações traçou-se a série histórica referente a esse período, a partir da qual se pode inferir a grandeza da problemática para os próximos anos.<br>Review sobre o procedimento de encerramento de aterros. |
| CAVALCANTE (2014)                   | Geração de lixiviados de aterros sanitários na Região Metropolitana de São Paulo: histórico e perspectivas.                                                                                        | Analisar dados de monitoramento de recalque superficial obtidos por meio de marcos superficiais em um aterro encerrado no RJ no período de 2008 a 2015.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Chu (2016)                          | Landfill Aftercare and Maintenance.                                                                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| Corrêa; Elk e Ritter (2017)         | Monitoramento de recalques de longo prazo no antigo vazadouro de Marambaia, Nova Iguaçu - RJ                                                                                                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| DENARDIN (2013)                     | ESTUDO DOS RECALQUES DO ATERRO SANITÁRIO DA CENTRAL DE RESÍDUOS DO RECREIO - MINAS DO LEÃO/RS<br>Inventory of methane emissions from municipal solid waste management in Pernambuco state, Brazil. | Acompanhamento de recalques e comparação com modelos de previsão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| DIOGO, ALESSANDRA e TATYANE. (2015) |                                                                                                                                                                                                    | Pretende demonstrar um inventário de emissões de metano no estado do Pernambuco                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
| EYAY (2016)                         | Previsão de recalques em aterros sanitários novos: caso do aterro de                                                                                                                               | Acompanhamento de recalques e comparação com modelos de previsão.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |

São Leopoldo.

|                                 |                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| FERREIRA (2010)                 | Estudo dos lixiviados das frações do aterro sanitário de São Carlos– SP por meio da caracterização físico-química. | Determinar as fases de decomposição das frações dos resíduos dispostos no aterro sanitário de São Carlos – SP a partir do estudo das características dos lixiviados gerados. Otimização de monitoramento, usando o aterro fechado em Zrenjanin, na Sérvia, como modelo experimental. O objetivo da otimização era encontrar parâmetros representativos que definissem os parâmetros físicos, processos químicos e biológicos no aterro metanogênico fechado e para tornar este processo menos caro. |
| JOVANOVIĆ, VUJIĆ e VUJIĆ (2017) | Optimization of the monitoring of landfill gas and leachate in closed methanogenic landfills.                      | Este artigo descreve pesquisas em andamento sobre o monitoramento de duas                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
| KOERNER (2016)                  | Monitoring Long-Term In Situ Conditions at Adjacent Dry and Wet MSW Landfill Cells.                                | células de aterro adjacentes com diferentes estratégias de gerenciamento de líquidos em um aterro municipal de resíduos sólidos (RSU). O monitoramento foi realizado por 20 anos.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| LEE, NIKRAZ e HUNG (2010)       | Influence of waste age on landfill leachate quality.                                                               | A influência da idade dos resíduos na característica de lixiviado de um aterro sanitário onde resíduos jovens e maduros células foram investigadas durante um período de seis anos para avaliar o impacto da idade dos resíduos na qualidade do lixiviado gerado.                                                                                                                                                                                                                                   |

|                     |                                                                                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |
|---------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lima (2015)         | “Análise do monitoramento da contaminação ambiental do solo do aterro de resíduos sólidos urbanos encerrado de Seropédica” | Determinar no solo os teores dos parâmetros: pH, alumínio, manganês, zinco, cádmio e chumbo, a partir de análise química, que servirá como indicativo do nível de contaminação deste solo e identificar as tecnologias de remediação de solos contaminados por metais pesados, que poderiam ser utilizadas.                                                   |
| LINS et al. (2011)  | ENCERRAMENTO E RECUPERAÇÃO DO ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS DA MURIBECA                                               | Apresentar as ações, compromissos e as atividades realizadas durante o encerramento do Aterro de Resíduos Sólidos da Muribeca.                                                                                                                                                                                                                                |
| LINS et al. (2011)  | ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DO LIXIVIADO DO ATERRO DA MURIBECA ANTES E APÓS O ENCERRAMENTO                                  | Analisar as características físico-químicas do lixiviado do Aterro de Resíduos Sólidos Urbanos da Muribeca, antes e após o seu encerramento, analisando também a biodegradabilidade do lixiviado no decorrer do tempo.                                                                                                                                        |
| LOPES (2011)        | Infiltração de água e emissão de metano em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos.                            | Avaliar a infiltração de água e as emissões de CH <sub>4</sub> em três diferentes camadas de cobertura, instaladas em uma célula experimental de aterro de resíduos sólidos, e analisar a influência da configuração construtiva, das características dos materiais e das variações climáticas nesses processos, e no potencial de oxidação CH <sub>4</sub> . |
| Lopes et al. (2018) | MONITORAMENTO DE LIXIVIADO GERADO EM ATERRO SANITÁRIO COM BASE EM PARÂMETROS QUÍMICOS.                                     | Analisar o comportamento dos parâmetros pH, AT e NAT no lixiviado gerado do Aterro Sanitário em Campina Grande (ASCG), Paraíba. O experimento consistiu em coletar amostras de lixiviado mensalmente entre os meses de julho a dezembro de 2017.                                                                                                              |

|                                              |                                                                                                                 |                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| LOPES, MACIEL e JUCÁ (2012)                  | Avaliação da emissão de metano em aterro experimental de resíduos sólidos na Muribeca/Pe–Brasil.                | Apresentar os resultados preliminares da investigação das emissões superficiais de metano (CH <sub>4</sub> ) em três diferentes camadas de cobertura em uma célula experimental, localizada no aterro de Muribeca, Recife / PE.                             |
| MARIANO e JUCÁ (2010)                        | Ensaio de campo para determinação de emissões de biogás em camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos. | Apresentar uma metodologia de campo utilizada para determinar as emissões de biogás através das camadas de cobertura de aterros de resíduos sólidos urbanos, por meio de ensaios simples, diretos e de baixo custo.                                         |
| Meegoda, Hettiarachchi e Hettiaratchi (2016) | Landfill Design and Operation                                                                                   | Review sobre o procedimento de design e operação de aterros, descrevendo o processo de monitoramento durante e pós encerramento.                                                                                                                            |
| Bocchiglieri (2010)                          | O lixiviado dos Aterros Sanitários em Estações de Tratamento dos Sistemas Públicos de Esgotos.                  | Apresenta a variação da produção de lixiviado em aterros sanitários                                                                                                                                                                                         |
| Naveen, Sivapullaiah e Sitharam (2016)       | Effect of aging on the leachate characteristics from municipal solid waste landfill.                            | Demonstrar o efeito do envelhecimento nas características do lixiviado de um resíduo sólido municipal na Terra Firma Biotechnologies Ltd situada na aldeia de Gundlahalli em Doddaballapur taluk, perto de Bangalore.                                       |
| OLIVEIRA (2013)                              | ESTUDO DAS EMISSÕES DE BIOGÁS EM CAMADAS DE COBERTURAS DE ATERRO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS                    | Avaliar as emissões de biogás pelo sistema de drenagem e em três diferentes configurações de camada de cobertura ao longo do tempo (2009-2012), em uma célula experimental localizada no antigo Aterro de resíduos da Muribeca, Jaboatão dos Guararapes/PE. |

|                                     |                                                                                                                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| OLIVEIRA (2013)                     | Avaliação de emissões fugitivas de biogás na camada de cobertura do aterro sanitário da CTR de Nova Iguaçu e do Lixão de Seropédica, Rio de Janeiro. | Analizar os resultados de monitoramento dos gases em relação à camada de cobertura existentes na CTR de Nova Iguaçu e no Lixão remediado de Seropédica.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
| Oliveira e Azevedo (2010)           | Indicadores ambientais no monitoramento de processos de recuperação de áreas degradadas pela disposição de resíduos sólidos                          | Selecionar os indicadores ambientais mais significativos e de fácil mensuração para monitoramento de processos de recuperação de áreas degradadas pela disposição de resíduos sólidos como proposta para os municípios de pequeno porte.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| POWELL, TOWNSEND E ZIMMERMAN (2015) | Estimates of solid waste disposal rates and reduction targets for landfill gas emissions.                                                            | Analizar a eficiência dos sistemas de drenagem de gases de mais de 850 aterros em comparação com as estimativas para os locais. Demonstrar os impactos do aterro encerrado da Caturrita, Santa Maria, estado do Rio Grande do Sul (RS), nos recursos hídricos superficiais.                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
| Rosa; Dalmolin e Copetti            | A poluição causada por aterros de resíduos sólidos urbanos sobre os recursos hídricos                                                                | Avaliar a variabilidade dos parâmetros físico-químicos do lixiviado oriundo do Aterro Controlado da Muribeca, localizado em Jaboatão dos Guararapes – PE, ao longo de um período de 11 anos. Estudar o comportamento geomecânico de um aterro de resíduos sólidos localizado no estado do Rio de Janeiro. Durante o período de dez meses, um aterro municipal de resíduos sólidos foi monitorado durante três fases diferentes: operação em condições normais de funcionamento, instabilização após chuvas torrenciais e interdição e encerramento do aterro por parte do Governo do Estado. |
| SANTOS FILHO (2013)                 | Avaliação temporal do lixiviado da Muribeca.                                                                                                         |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
| Schuler (2010)                      | ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE UM ATERRO MUNICIPAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS INSTRUMENTADO                                                            |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|                           |                                                                                                                                                    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Simões et al. (2010)      | Considerações sobre a Interpretação de Registros de Monitoramento de Recalques em Aterros Sanitários                                               | Comparação entre recalques de um aterro em Belo Horizonte com modelos de previsão de recalques.                                                                                                                                                                                                   |
| SLUȘER et al. (2017)      | POSTCLOSURE INFLUENCE OF EMISSIONS RESULTED FROM MUNICIPAL WASTE DUMP SITES: A CASE STUDY OF THE NORTH-EAST REGION OF ROMANIA.                     | Avaliar o nível de poluição considerando 5 locais de despejo de resíduos municipais fechados da região Nordeste da Romênia durante o período 2013-2015, tendo em mente, à primeira vista, a possibilidade de valorização de emissões de metano na forma de biogás.                                |
| TEIXEIRA (2015)           | PREVISÃO E MONITORAMENTO DE RECALQUES EM ATERROS SANITÁRIOS/ ESTUDO DE CASOS: CENTRAL DE RESÍDUOS DE RECREIO – MINAS DO LEÃO/RS E SÃO LEOPOLDO/RS. | Avaliar os recalques de dois aterros sanitários com medidas de deslocamento por meio de marcos superficiais, verificando a eficiência de alguns modelos de previsão de recalques em aterros sanitários de RSU existentes na literatura.                                                           |
| Townsend et al. (2015)    | Final Landfill Disposition.                                                                                                                        | Discutir sobre as práticas sustentáveis para encerramento de aterros. Apresenta sobre operação de aterro sanitário, produção de chorume, coleta, caracterização e tratamentos sob diferentes condições operacionais e ambientais, status do tratamento do lixiviado do aterro e direções futuras. |
| Zhang e Surampalli (2016) | Sustainable Solid Waste Management.                                                                                                                |                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| ZHENG et al. (2015)       | Evaluation of monitoring indicators for the post-closure care of a landfill for MSW characterized with low lignin content.                         | Analisar diferente parâmetros físico- químico do lixiviado de acordo com diferentes tratamento pós encerramento dos mesmos.                                                                                                                                                                       |

---