



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS**  
**DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA**

**VICTOR SAULO MOREIRA**

**APLICAÇÃO DA ELETORRESISTIVIDADE PARA DETECÇÃO DE ZONAS  
DE ACÚMULO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO**

**FORTALEZA**

**2024**

VICTOR SAULO MOREIRA

APLICAÇÃO DA ELETRORRESISTIVIDADE PARA DETECÇÃO DE ZONAS DE  
ACÚMULO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

Coorientador: Dr. Jackson Alves Martins.

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

M839a Moreira, Victor Saulo.

Aplicação da eletrorresistividade para detecção de zonas de acúmulo de biogás em aterro sanitário /  
Victor Saulo Moreira. – 2024.  
79 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação  
em Geologia, Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco.

Coorientação: Prof. Dr. Jackson Alves Martins.

1. Geofísica aplicada. 2. Aterro sanitário. 3. Biogás. 4. Eletrorresistividade. I. Título.

CDD 551

---

VICTOR SAULO MOREIRA

APLICAÇÃO DA ELETRORRESISTIVIDADE PARA DETECÇÃO DE ZONAS DE  
ACÚMULO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO

Dissertação apresentada ao Programa de  
Pós-Graduação em Geologia da  
Universidade Federal do Ceará, como  
requisito parcial à obtenção do título de  
Mestre em Geologia. Área de  
concentração: Geologia.

Aprovada em: \_\_/\_\_/\_\_\_\_.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof<sup>a</sup>. Dra. Karen Maria Leopoldino Oliveira  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva  
Universidade Federal do Pará (UFPA)

A Deus.

Aos meus pais, por todos os incontáveis  
esforços e ensinamentos.

## **AGRADECIMENTOS**

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro para execução desta presente pesquisa. Agradeço à Global Image e à GNR Engenharia, que disponibilizaram os dados e permitiram utilização dos mesmos, tornando possível a execução do presente trabalho.

Ao meu orientador Prof. Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco, pela parceria, apoio e ensinamentos ao longo dessa trajetória. Ao meu amigo e coorientador, Dr. Jackson Alves Martins, sou grato pelo companheirismo, ensinamentos e apoio. Aos professores participantes da banca examinadora Prof<sup>ra</sup>. Dra. Karen Maria Leopoldino Oliveira e Prof. Dr. Marcos Welby Correa Silva por todo tempo dedicado e pelas valiosas colaborações e sugestões.

Aos meus amigos do laboratório de geofísica (LGPSR): Charles, Daniel, Hermano, Miguel e Nilton que estiveram ao meu lado diariamente durante toda jornada sempre com dedicação, trabalho duro e bom humor. Também agradeço aos meus amigos Allison Maia, Matheus Edson, Cláudio Ângelo, Rafael Alves, Dhiego Bittencourt, Eduardo Côrrea, pelo companheirismo, parceria e apoio ao longo dessa jornada.

Aos meus pais Elionizio Moreira da Silva e Maria Lislane Moreira, que sempre me apoiaram e deram suporte incondicional. Aos meus irmãos Raphael Lucas e Lohanne Vanessa, muito obrigado pelo carinho e companheirismo.

À minha querida e amada esposa, Deborah Victória Moreira dos Santos, por estar sempre ao meu lado, dando suporte em momentos de dificuldade e sendo um pilar em minha vida.

*“A ciência e a vida cotidiana não podem e não  
devem ser separadas.” (Rosalind Franklin)*

## RESUMO

A produção de energia a partir do biogás gerado em aterros sanitários é uma alternativa economicamente viável e sustentável, contribuindo para o cenário de transição da matriz energética mundial. O biogás é uma mistura gasosa majoritariamente composta por metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) proveniente da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos. O Brasil possui grande potencial para geração de energia através do biogás, uma vez que cerca de 45,3% dos resíduos sólidos urbanos no país é composto por matéria orgânica. Este trabalho apresenta os resultados de um estudo geofísico realizado no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), visando caracterizar as camadas geoelétricas existentes e evidenciar possíveis zonas de acúmulo de biogás. Portanto, foram realizadas 8 (oito) seções de aquisição geofísica aplicando o método da eletrorresistividade e utilizando o arranjo dipolo-dipolo, também foram adquiridas imagens aéreas para realização da aerofotogrametria do ASMOC e analisadas vazões dos poços de captação do biogás presentes no aterro. As seções de inversão geofísica evidenciaram um caráter predominantemente condutivo em todo aterro, com resistividades variando entre 1,2 e 127 ohm.m. O background encontrado nas seções variou entre 1,2 e 5ohm.m, evidenciando um caráter extremamente condutivo presente no ASMOC, sendo associado à presença de matéria orgânica, chorume e percolação da água da chuva. O estudo permitiu delimitar uma zona com maiores valores de resistividade (associadas ao biogás) localizada na região mais rasa e central do aterro (até 15 metros de profundidade). Os valores de vazões destacaram que os poços mais produtores de biogás estão localizados na região central do ASMOC, corroborando com a resposta das tomografias elétricas.

**Palavras-Chave:** geofísica aplicada; aterro sanitário; biogás.



## ABSTRACT

Energy production from biogas generated in sanitary landfills is an economically viable and sustainable alternative, contributing to the global energy transition. Biogas is a gaseous mixture primarily composed of methane ( $\text{CH}_4$ ) and carbon dioxide ( $\text{CO}_2$ ) resulting from the anaerobic degradation of organic matter in solid waste. Brazil has significant potential for energy generation through biogas, as approximately 45.3% of the country's urban solid waste is composed of organic matter. This study presents the results of a geophysical investigation conducted at the Metropolitan West Sanitary Landfill of Caucaia (ASMOC), aiming to characterize the existing geoelectrical layers and identify potential biogas accumulation zones. Eight geophysical acquisition sections were performed using the electrical resistivity method and a dipole-dipole array. Aerial images were also obtained for aerophotogrammetry of the ASMOC, and flow rates from biogas collection wells in the landfill were analyzed. The geophysical inversion sections revealed a predominantly conductive character throughout the landfill, with resistivities ranging from 1.2 to 127  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ . The background resistivity values found in the sections varied between 1.2 and 5  $\text{ohm}\cdot\text{m}$ , indicating an extremely conductive nature within the ASMOC, which is associated with the presence of organic matter, leachate, and rainwater percolation. The study identified a zone with higher resistivity values (associated with biogas) located in the shallower and central region of the landfill (up to 15 meters deep). Flow rate data showed that the most productive biogas wells are located in the central region of the ASMOC, corroborating the geophysical findings.

**Keywords:** applied geophysics; landfill; biogas.

## LISTA DE FIGURAS

|           |                                                                                                                                                                                                                    |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1  | – Mapa de Localização do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, destacando as principais rodovias da região e limites municipais.....                                                                        | 17 |
| Figura 2  | – Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %).....                                                                                                                                         | 21 |
| Figura 3  | – Gravimetria dos RSU no Brasil.....                                                                                                                                                                               | 23 |
| Figura 4  | – Fases de produção do biogás em aterros sanitários.....                                                                                                                                                           | 26 |
| Figura 5  | – Tempo de cada fase para formação do biogás.....                                                                                                                                                                  | 26 |
| Figura 6  | – Esquema simplificado de aterro sanitário do método área ou superfície.....                                                                                                                                       | 31 |
| Figura 7  | – Fluxograma representativo de etapas realizadas para execução do estudo realizado no ASMOC.....                                                                                                                   | 35 |
| Figura 8  | – Aquisição dos pontos de controle (A) e levantamento aerofotogramétrico (B) no ASMOC.....                                                                                                                         | 36 |
| Figura 9  | – Detalhes da interface do <i>software map pilot</i> exibindo o planejamento das linhas de voo sobre o ASMOC.....                                                                                                  | 37 |
| Figura 10 | – Esquema de aquisição geofísica utilizando a técnica da tomografia elétrica.....                                                                                                                                  | 40 |
| Figura 11 | – Disposição inicial dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo no CE.....                                                                                                                                             | 41 |
| Figura 12 | – Imagens de aquisição em campo, a figura A) demonstra a etapa de aquisição com o equipamento já em operação automatizada, a figura B) representa os operadores conectando os eletrodos ao cabo multieletrodo..... | 42 |
| Figura 13 | – Mapa demonstrando as posições das seções geofísicas realizadas no ASMOC e relação das seções com o espaçamento dos eletrodos utilizados.....                                                                     | 43 |
| Figura 14 | – Precisão topográfica dos produtos da aerofotogrametria.....                                                                                                                                                      | 45 |
| Figura 15 | – Ortomosaico do ASMOC.....                                                                                                                                                                                        | 45 |
| Figura 16 | – Modelo Digital do Terreno (MDT) elaborado para área de pesquisa e seu entorno.....                                                                                                                               | 46 |
| Figura 17 | – Modelo tridimensional do ASMOC, gerado no software Leapfrog.....                                                                                                                                                 | 46 |

|           |                                                                                                                                                  |    |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 18 | – Ilustração comparativa da interpolação pelo método da krigagem, realizada para os meses de janeiro (A), fevereiro (B) e março (C) de 2021..... | 48 |
| Figura 19 | – Seção de resistividade invertida L5 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 51 |
| Figura 20 | – Seção de resistividade invertida L6 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 53 |
| Figura 21 | – Seção de resistividade invertida L7 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 55 |
| Figura 22 | – Seção de resistividade invertida L8 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 57 |
| Figura 23 | – Seção de resistividade invertida L1 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 59 |
| Figura 24 | – Seção de resistividade invertida L2 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 61 |
| Figura 25 | – Seção de resistividade invertida L3 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 63 |
| Figura 26 | – Seção de resistividade invertida L4 e seção com zonas de resistividade interpretadas.....                                                      | 65 |
| Figura 27 | – Integração do modelo tridimensional do ASMOC com os perfis geofísicos L5 a L8.....                                                             | 69 |
| Figura 28 | – Integração do modelo tridimensional do ASMOC com os perfis geofísicos L1 a L4.....                                                             | 70 |
| Figura 29 | – Integração das seções de inversão geofísica L5 a L8.....                                                                                       | 71 |
| Figura 30 | – Integração das seções de inversão geofísica L1 a L4.....                                                                                       | 72 |

## **LISTA DE TABELAS**

|                                                                                                                                       |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 – Comparativo do potencial calorífico entre diferentes combustíveis.....                                                     | 24 |
| Tabela 2 – Classificação das camadas geelétricas no aterro sanitário de Pera Galini e seus respectivos valores de resistividades..... | 33 |
| Tabela 3 – Síntese dos parâmetros utilizados durante o levantamento aerofotogramétrico no ASMOC.....                                  | 37 |
| Tabela 4 – Informações dos poços de captação de biogás do ASMOC.....                                                                  | 47 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| ABNT  | Associação Brasileira de Normas Técnicas        |
| ASMOC | Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia |
| CE    | Caminhamento Elétrico                           |
| ERT   | <i>Electrical resistivity Tomography</i>        |
| GPR   | Ground Penetrating Radar                        |
| MDT   | Modelo Digital de Terreno                       |
| NBR   | Norma Brasileira Regulamentar                   |
| NE    | Nordeste                                        |
| RTK   | <i>Real time kinematic</i>                      |
| RSU   | Resíduos Sólidos Urbanos                        |
| SEV   | Sondagem Elétrica Vertical                      |
| UTM   | Universal Transversa de Mercator                |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|             |                   |
|-------------|-------------------|
| <i>Ca</i>   | Cálcio            |
| <i>Mg</i>   | Magnésio          |
| <i>Na</i>   | Sódio             |
| <i>K</i>    | Potássio          |
| $NH_4^+$    | Amônio            |
| <i>Fe</i>   | Ferro             |
| <i>Mn</i>   | Manganês          |
| <i>Cl</i>   | Cloro             |
| $SO_4^{2-}$ | Sulfato           |
| $HCO_3^-$   | Bicarbonato       |
| <i>Cd</i>   | Cádmio            |
| <i>Cr</i>   | Cromo             |
| <i>Pb</i>   | Chumbo            |
| <i>Cu</i>   | Cobre             |
| <i>Ni</i>   | Níquel            |
| <i>Zn</i>   | Zinco             |
| $\rho$      | Letra grega Rô    |
| $\sigma$    | Letra grega sigma |

## SUMÁRIO

|                |                                                           |           |
|----------------|-----------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b>       | <b>INTRODUÇÃO.....</b>                                    | <b>15</b> |
| <b>1.1</b>     | <b>Considerações gerais.....</b>                          | <b>15</b> |
| <b>1.2</b>     | <b>Objetivos.....</b>                                     | <b>16</b> |
| <i>1.2.1</i>   | <i>Objetivos gerais.....</i>                              | <i>16</i> |
| <i>1.2.2</i>   | <i>Objetivos específicos.....</i>                         | <i>16</i> |
| <b>1.3</b>     | <b>Localização e acesso.....</b>                          | <b>17</b> |
| <b>1.4</b>     | <b>Caracterização da área de estudo.....</b>              | <b>18</b> |
| <b>2</b>       | <b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>                        | <b>19</b> |
| <b>2.1</b>     | <b>Considerações iniciais .....</b>                       | <b>19</b> |
| <b>2.2</b>     | <b>Resíduos sólidos e meio ambiente.....</b>              | <b>20</b> |
| <b>2.3</b>     | <b>Processos geradores do biogás.....</b>                 | <b>23</b> |
| <i>2.3.1</i>   | <i>Composição gravimétrica dos RSU.....</i>               | <i>23</i> |
| <i>2.3.2</i>   | <i>Caracterização do biogás.....</i>                      | <i>24</i> |
| <i>2.3.3</i>   | <i>Fatores controladores para produção do biogás.....</i> | <i>27</i> |
| <b>2.4</b>     | <b>Aterros sanitários.....</b>                            | <b>27</b> |
| <i>2.4.1</i>   | <i>Aspectos do aterro sanitário.....</i>                  | <i>28</i> |
| <i>2.4.1.1</i> | <i>Local de implantação do aterro sanitário.....</i>      | <i>28</i> |
| <i>2.4.1.2</i> | <i>Impermeabilização.....</i>                             | <i>29</i> |
| <i>2.4.1.3</i> | <i>Sistema de drenagem.....</i>                           | <i>29</i> |
| <i>2.4.1.4</i> | <i>Camada de cobertura.....</i>                           | <i>30</i> |
| <i>2.4.2</i>   | <i>Métodos de execução de aterros sanitários.....</i>     | <i>30</i> |
| <b>2.5</b>     | <b>Estudos geofísicos em aterros sanitários.....</b>      | <b>31</b> |
| <b>3</b>       | <b>MATERIAL E MÉTODOS.....</b>                            | <b>34</b> |
| <b>3.1</b>     | <b>Considerações iniciais .....</b>                       | <b>34</b> |
| <b>3.2</b>     | <b>Levantamento aerofotogramétrico.....</b>               | <b>36</b> |
| <b>3.3</b>     | <b>Fundamentação teórica do método geofísico.....</b>     | <b>38</b> |
| <i>3.3.1</i>   | <i>Método da eletrorresistividade.....</i>                | <i>39</i> |
| <i>3.3.2</i>   | <i>Arranjo dipolo-dipolo.....</i>                         | <i>41</i> |
| <b>3.4</b>     | <b>Aquisição dos dados ERT.....</b>                       | <b>42</b> |
| <b>3.5</b>     | <b>Processamento e integração de dados.....</b>           | <b>43</b> |
| <b>4</b>       | <b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>                       | <b>44</b> |

|              |                                             |           |
|--------------|---------------------------------------------|-----------|
| <b>4.1</b>   | <b>Aerofotogrametria.....</b>               | <b>44</b> |
| <b>4.2</b>   | <b>Poços de captação de biogás.....</b>     | <b>47</b> |
| <b>4.3</b>   | <b>Geofísica aplicada.....</b>              | <b>49</b> |
| <b>4.3.1</b> | <b><i>Discussão dos resultados.....</i></b> | <b>66</b> |
| <b>4.4</b>   | <b>Integração das seções.....</b>           | <b>68</b> |
| <b>5</b>     | <b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>           | <b>74</b> |
|              | <b>REFERÊNCIAS.....</b>                     | <b>76</b> |



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Considerações gerais

A Segunda Revolução Industrial (SEC. XIX) foi um período marcado por diversos avanços tecnológicos, como a introdução de novas máquinas, a expansão das ferrovias, a eletrificação e a produção em massa (MARRIOTT, 2015). Desse modo, gerando mudanças significativas na forma como a sociedade produzia, consumia e interagia com o meio ambiente. Como uma das consequências da revolução industrial, teve-se o aumento exponencial na produção de resíduos sólidos e consumo energético para sustentar a cadeia produtiva que havia surgido, resultando em quantidades sem precedentes de resíduos gerados pelas indústrias e cidades. O efeito ambiental pôde ser notado, com a contaminação de rios, córregos, além da amontoação de lixo nos arredores das áreas urbanas. Resultando na formação de grandes lixões a céu aberto, sendo vetor de doenças (CRUVINEL, 2019) e contaminação do solo, subsolo e aquíferos (DE SIQUEIRA NETO, 2016).

Desse modo, visando evitar/mitigar as contaminações geradas pela má disposição dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU), tem-se o aterro sanitário como forma adequada para disposição final de RSU. Seguindo normas de engenharia, a construção de um aterro sanitário prevê uma série de medidas como a instalação de elementos para captação, armazenamento e tratamento dos lixiviados e biogás, sistemas de impermeabilização de fundos e laterais, sistemas de drenagem e tratamento de lixiviados, sistemas de drenagem de água superficial, monitoramento ambiental e geotécnico (Programa Nacional de Capacitação de Gestores Ambientais, 2009).

A produção de energia através da captação do biogás, gerado em grande escala em aterros sanitários, é uma alternativa viável economicamente e sustentável (Dos Santos, 2016). O biogás é uma mistura gasosa majoritariamente composta por metano ( $\text{CH}_4$ ) e gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ) proveniente da degradação anaeróbia da matéria orgânica dos resíduos sólidos. É um gás de alto potencial de aproveitamento energético em termos nacionais, considerando que 45,3% dos resíduos sólidos no Brasil são compostos por matéria orgânica (ABRELPE, 2020). Em 2022 apenas 61% dos RSU do Brasil foram destinados a aterros sanitários (ABRELPE, 2022), demonstrando que ainda há muito a ser investido em coleta e destinação adequada de RSU no país.

Como exemplo de aterro sanitário que gera energia temos o aterro sanitário de Caieiras-SP, maior do Brasil, produz em média 230 mil MWh de energia por ano, podendo atender uma cidade de 300 mil habitantes (MIDR, 2022). O Brasil possui a 9ª maior capacidade de geração de energia elétrica com a fonte biogás do mundo, com capacidade de 417Mw (IRENA, 2021).

Nesse contexto, a geofísica desempenha uma importante função no entendimento da dinâmica de um aterro sanitário, possibilitando caracterizar zonas de contaminação por chorume em aterros sanitários e seu entorno (LAUREANO, 2007), bem como zonas de acúmulo de biogás (MOREIRA *et al*, 2015).

A presente pesquisa utilizou do método geofísico para aplicação da eletrorresistividade no Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC), situado no município de Caucaia, na região metropolitana de Fortaleza-CE. O estudo visa caracterizar as camadas geoelétricas presentes no interior do aterro, mapeando zonas de acúmulo de biogás e chorume, buscando contribuir com a captação de biogás em aterros sanitários. Para isso, foi realizado uma campanha de aquisição geofísica com 8 (oito) seções de ERT (*electrical resistivity Tomography*), além de um levantamento aerofotogramétrico e análise dos poços captadores de biogás presentes no aterro.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivos gerais

- i) Aplicar o método da eletrorresistividade para a caracterização geoelétrica do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC);
- ii) Identificar regiões de acúmulo de chorume e biogás no interior do aterro sanitário;
- iii) Contribuir com o entendimento do comportamento do biogás, auxiliando sua exploração em aterros sanitários.

### 1.2.2 Objetivos específicos

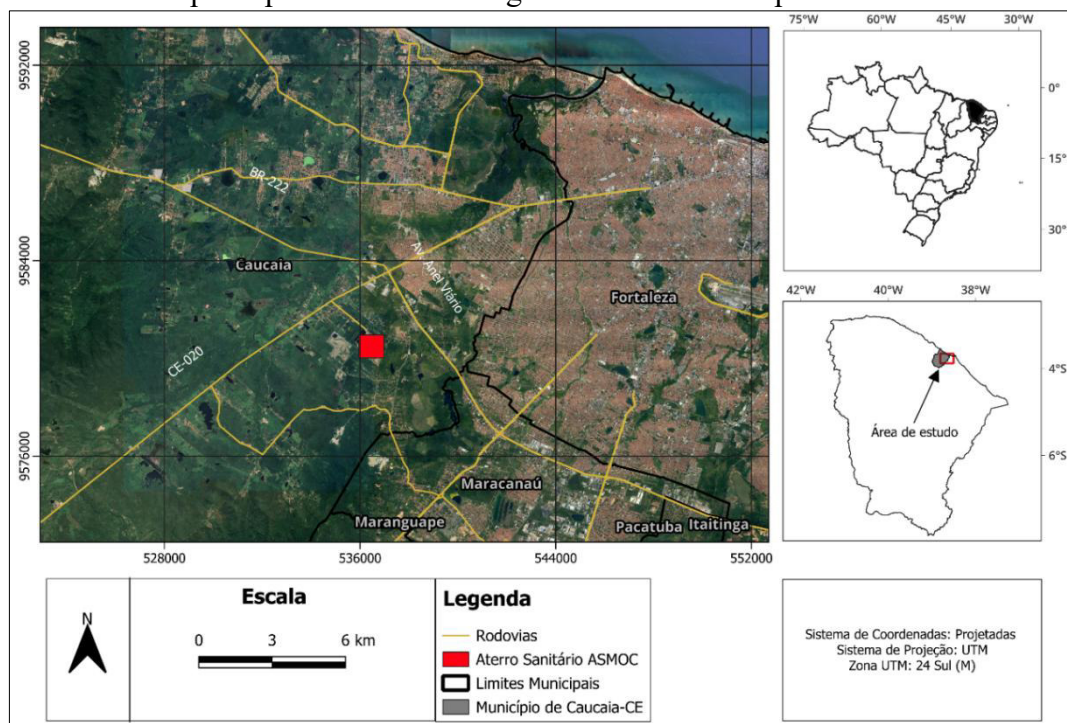
- i) Criar modelos de inversão geofísica 2D;

- ii) Criar modelo 3D do aterro sanitário, integrando com perfis de tomografia elétrica;
- iii) Gerar mapa de interpolação com as vazões dos poços do ASMOC;
- iv) Identificar camadas geoeletricas no interior do aterro sanitário.

### 1.3 Localização e acesso.

O Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia (ASMOC) está situado no município de Caucaia-CE, na zona oeste da Região Metropolitana de Fortaleza (RMF). O acesso ao ASMOC é feito principalmente através das rodovias BR-020 e CE-085, além de estradas secundárias. O aterro sanitário está localizado na rodovia BR-020, SN, km 14, Loteamento Lino da Silveira, SETOR D; Fazenda Carrapicho, Bairro Jurema, Caucaia, de acordo com a figura 1.

Figura 1: Mapa de Localização do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia, destacando as principais rodovias da região e limites municipais.



Fonte: autor.

#### 1.4 Caracterização da área de estudo

O Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia foi construído como componente de um projeto que integrou parte do Plano Metropolitano de Limpeza Pública, elaborado pela Autarquia da Região Metropolitana de Fortaleza (AUMEF), entidade vinculada ao Governo do Estado do Ceará. O aterro foi construído em um terreno contido pelas coordenadas UTM de longitude 536.000 e 544.000 e de latitude 9.576.000 e 9.584.000 (figura 1.1) zona 24S. Tal terreno possui formato retangular e uma área total de 123 hectares, dos quais 78 hectares são destinados ao recebimento dos RSU. A área é dividida em 17 setores e subdividida em 67 trincheiras, que ao todo possuem 7.000m<sup>2</sup> (70 metros de largura e 100 metros de comprimento) e são escavadas a uma profundidade que pode variar entre três e cinco metros (NETO & CASTRO, 2005).

Conforme o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE, 2017), o município de Caucaia apresenta clima tropical quente semi-árido, com pluviosidade anual de 1.243,2mm e temperatura média variando entre 26° e 28°. Seu período chuvoso ocorre de janeiro a maio.

Segundo o projeto inicial, a capacidade de recebimento de resíduos sólidos urbanos seria 16 mil toneladas/mês, tendo vida útil estimada em 15 anos (ASTEF, 1989). Construído em 1990 pelo Governo do Estado do Ceará, o aterro começou a operar em 1991, recebendo resíduos somente de Caucaia-CE. Porém, a partir de 1998, passa a receber resíduos também de Fortaleza-CE, após a desativação do lixão do Jangurussú que até então era o destino dos RSU da capital. A partir de 2002 os resíduos passaram a ser compactados por rolos compactadores de 24 toneladas, permitindo maior sobrevida para o aterro sanitário. Em 2010 o ASMOC operava com 70% de sua capacidade total, e previa que até 2015 chegaria ao fim de sua operação (ACFOR (2010)).

O ASMOC recebe resíduos de origem doméstica, industrial, sendo de classe II (não perigosos) conforme a NBR-10.004. Estes não são submetidos a um processo de triagem, sendo pesados e em seguida levados para serem descarregados nas células de resíduos. O acesso às células de depósitos por recicladores não é permitido, a quantidade de resíduos aportados no ASMOC diariamente é de aproximadamente 3.600 toneladas (LINARD, 2010).

A camada de solo para cobertura do aterro tem uma espessura que varia de 30 a 80cm de areia fina e média, siltosa, em seguida uma camada longa de areia argilosa de baixa permeabilidade. Um solo argiloso também é utilizado para cobertura diária dos

resíduos. Para a proteção tanto do subsolo como lençol freático da região foi utilizado um solo argiloso para impermeabilização do fundo do aterro sanitário (ACFOR, 2010). A ausência de sinais de lençol freático no local, combinado com baixa permeabilidade do solo, torna improvável a poluição das águas subterrâneas por infiltração de lixiviados (OLIVEIRA, 2011). Todo líquido gerado através da decomposição dos resíduos bem como água da precipitação são canalizados e seguem para tratamento nas lagoas de estabilização.

Foi realizado, no segundo semestre de 2009, um estudo sobre o percentual de cada tipo de material (composição gravimétrica) disposto diariamente no ASMOC. Nesta pesquisa, Santos e Mota (2010) analisaram dez amostras de resíduos com pesos diferentes (12,5, 50, 75, 100, 125, 150, 250, 300, 500 e 750 Kg). Os resultados da composição gravimétrica apontaram que cerca de 47,5% (em massa) dos RSU depositados no aterro sanitário são de material orgânico. Além disso 14,2% são papel/ papelão, 8,7% são plástico filme, 7,0% são plástico rígido (incluindo PET), 6,4% são outros (fraldas, areia, absorventes, pedaços de isopor, entre outros), 3,3% são metais, 3,2% são trapos, 3,0% são borrachas, 2,6% são embalagem tetrapak, 2,2% são madeira e 2,1% são vidro. Esse estudo evidencia o grande potencial para geração de biogás presente no ASMOC, associado a abundância de material orgânico presente nos resíduos destinados ao aterro.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Considerações iniciais**

Este capítulo consiste na realização de um levantamento bibliográfico, tendo como propósito embasar e auxiliar no entendimento de processos pertinentes a composição deste trabalho. Fornecendo subsídios teóricos para a elaboração de uma pesquisa que correlaciona a utilização de geofísica como ferramenta na prospecção de biogás produzidos em aterros sanitários.

Nessa etapa foram consultados livros, teses, dissertações e artigos que buscaram compreender e caracterizar aterros sanitários com foco em produção de biogás (SVENSSON, 2007), bem como pesquisas que abordam a caracterização do biogás e sua viabilidade e potencial para aproveitamento energético (DOS SANTOS, 2016).

## 2.2 Resíduos sólidos e meio ambiente

Há diferentes formas de classificação de resíduos sólidos, sendo mais comum classificar quanto a riscos potenciais de contaminação do meio ambiente e quanto à natureza ou origem (PEÑIDO MONTEIRO *et al.*, 2001).

A Norma NBR 10.004/2004 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) classifica os resíduos sólidos em classe I (perigosos) e classe II (não perigosos), onde a classe II é subdivida em classe IIA (não inertes) e classe IIB (inertes). Na classe I os resíduos apresentam características de inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade ou patogenicidade, na classe IIA os resíduos devem respeitar os parâmetros de solubilidade estabelecidos pela norma e podem ter propriedades de biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. Já os resíduos de classe IIB apresentam baixa solubilidade ou nenhuma solubilidade conforme os parâmetros estabelecidos para cada componente.

A Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), classifica os resíduos sólidos como: resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos de serviços de saúde, resíduos industriais perigosos e resíduos industriais comuns. Os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) compreendem todos os resíduos sólidos gerados num aglomerado urbano, excetuados os resíduos de serviços de saúde, os resíduos industriais perigosos e os resíduos de portos e aeroportos (ABRELPE, 2003).

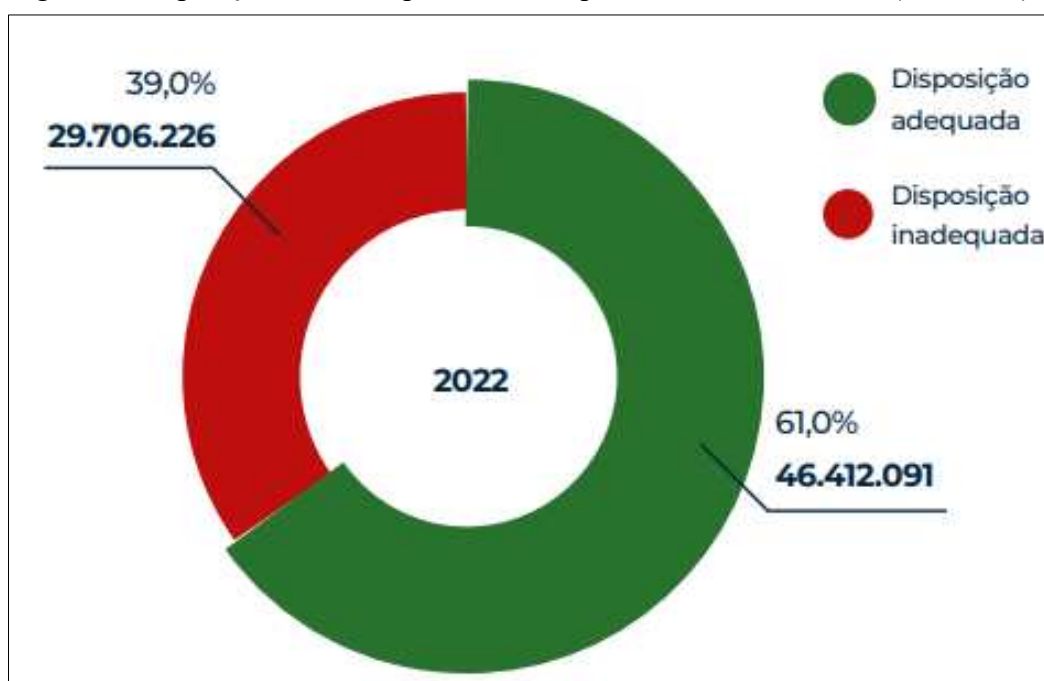
Há três tipos de disposição final dos RSU, sendo eles: Lixão; Aterro controlado; Aterro sanitário. Contudo, somente o aterro sanitário é reconhecido como método adequado pela lei 12.305/2010, que trata da Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS. O lixão é caracterizado pelo acúmulo deliberado de lixo sobre o solo, sem o uso de medidas de proteção ao meio ambiente ou para a saúde pública. Os aterros controlados se diferenciam através da existência de algumas operações como compactação e cobertura dos resíduos sólidos, contudo não havendo nenhum sistema de drenagem, impermeabilização e controle de entrada de resíduos. Desse modo, permitindo a infiltração de poluentes no subsolo e lençol freático, e consequente contaminação (GADOTTI, 1997).

A Norma NBR 8.419/1992 da ABNT apresenta o projeto de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, definindo-o como uma técnica de disposição de resíduos no

solo que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra após cada jornada de trabalho. Além disso, a norma afirma ser uma forma de disposição final considerada segura e ambientalmente adequada. Aterros sanitários precisam ter sistemas de drenagem de águas pluviais, sistema de impermeabilização inferior e superior, sistema de drenagem de percolato, sistema de drenagem dos gases (caso viável economicamente) e sistema de tratamento do percolato.

Segundo a ABRELPE, o Brasil gerou em 2022 cerca de 76,1 milhões de toneladas de RSU, com isso, cada brasileiro produziu, em média, 381 kg de RSU no ano. Em 2022 cerca de 46,4 milhões de toneladas de RSU foram destinadas a aterros sanitários (figura 2), representando apenas 61% do total de resíduos sólidos produzidos. Desse modo, 29,7 milhões de toneladas de RSU tiveram sua disposição final inadequada, seja ela em aterros controlados, lixões, ou qualquer outro tipo de disposição final.

Figura 2: Disposição final adequada x inadequada de RSU no Brasil (t/ano e %).



Fonte: ABRELPE, 2022.

Cruvinel *et al.*, (2019), pesquisou sobre condições de saúde e risco a doenças em catadores no maior lixão da América Latina e segundo maior do mundo, com 201 hectares e cerca de 40 milhões de toneladas de lixo acumulado, localizado a 15 km de distância de Brasília – Distrito Federal, chamado de “Lixão da Estrutural”. Outro problema ambiental associado ao Lixão da Estrutural seria sua proximidade com o Park

Nacional de Brasília (área de conservação) e do rio Cabeceira do Valo. A pesquisa contou com mais de mil catadores que realizaram diversos exames para detecção de variados tipos de doenças. Como resultado, observou-se que 68,7% dos catadores sofreram acidentes a maioria deles envolvendo vidros, agulhas e latas, as doenças mais referidas foram: doenças osteomusculares (78,7%); arbovírus (28,6%); diarreia episódica (24,9%); hipertensão (24,2%); bronquite (14,3%); vermes intestinais (12,6%) e diabetes (10,1%).

Rodrigues e Taioli (2003) estudaram a retenção de metais pesados do solo presente na base e cobertura do lixão de Ilhabela – SP. Concluíram que amostras de solos que tiveram contato com chorume apresentam enriquecimento pelos íons chumbo (Pb), Níquel (Ni) e Zinco (Zn), possibilitando posterior contaminação do lençol freático.

O chorume é um subproduto da decomposição dos resíduos sólidos e possui alto potencial contaminante, consiste em um líquido de alta carga orgânica, e forte coloração, é produzido a partir da decomposição química e microbiológica dos resíduos depositados em um aterro (MORAIS *et al.*, 2006). A composição química do chorume possui grande variabilidade, dependendo da origem dos resíduos, forma de disposição, manejo e idade do aterro, é também influenciado por fatores climáticos, destacando a quantidade de chuva e variação da temperatura.

De maneira geral, o chorume é composto por quatro partes principais: matéria orgânica dissolvida (formada principalmente por metano, ácidos graxos voláteis, compostos húmicos e fúlvicos), compostos orgânicos xenobióticos (representados por hidrocarbonetos aromáticos, compostos de natureza fenólica e compostos organoclorados alifáticos), macrocomponentes inorgânicos ( $Ca$ ,  $Mg$ ,  $Na$ ,  $K$ ,  $NH_4^+$ ,  $Fe$ ,  $Mn$ ,  $Cl$ ,  $SO_4^{2-}$  e  $HCO_3^-$ ) e metais potencialmente tóxicos como o  $Cd$ ,  $Cr$ ,  $Cu$ ,  $Pb$ ,  $Ni$  e  $Zn$  (CHROISTENSEN *et al.*, 2001).

Laureano (2007) realizou estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT, seus resultados apresentaram fortes indícios de contaminação, principalmente na região das lagoas de tratamento de chorume, com a zona da suposta contaminação em 30 metros de profundidade, locais com deposição de lixo recente apresentaram indícios de contaminação ainda mais atenuados, dando indícios de que a impermeabilização de base pode não estar sendo eficiente.

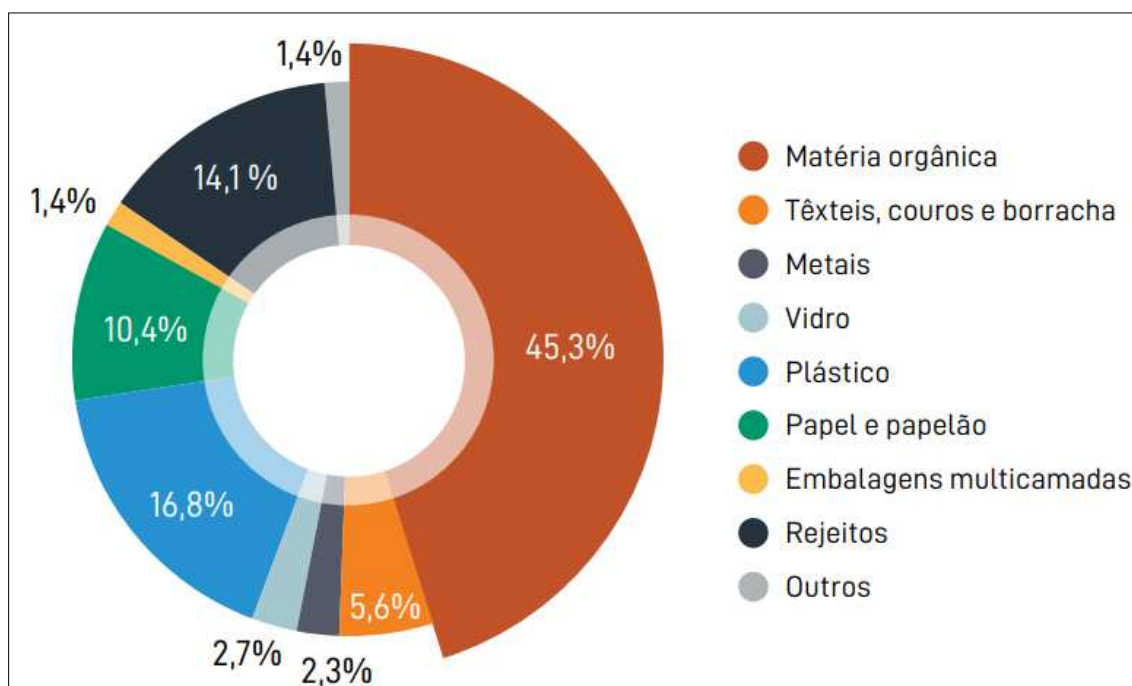


## 2.3 Processos geradores do biogás

### 2.3.1 Composição gravimétrica dos RSU

Para estudarmos os produtos gerados a partir da decomposição dos resíduos sólidos urbanos, é necessário analisar a composição dos mesmos, a isto dar-se o nome de composição gravimétrica, que consiste na categorização dos tipos de materiais descartados pela população (MONTEIRO *et al.*, 2001). No ano de 2020 a ABRELPE realizou a gravimetria dos RSU de todo Brasil (figura 3).

Figura 3: Gravimetria dos RSU no Brasil.



Fonte: ABRELPE, 2020.

O estudo concluiu que a fração orgânica é a principal componente dos RSU, com 45,3%. Já os resíduos recicláveis secos, somam 33,6%, sendo compostos em sua maioria pelos plásticos, com 16,8%, seguidos de papel e papelão 10,4%, além de vidros (2,7%), metais (2,3%) e embalagens multicamadas (1,4%). Rejeitos correspondem a 14,1% e são compostos principalmente por materiais sanitários, as demais frações são resíduos têxteis, couros e borrachas com 5,6% e outros resíduos com 1,4%, que contemplam diversos materiais, teoricamente objetos de logística reversa.

### 2.3.2 Caracterização do biogás

O biogás, também conhecido como gás do lixo, consiste em uma junção de diferentes gases produzidos através da digestão anaeróbia do material orgânico que compõe os resíduos sólidos urbanos, sob ação de bactérias específicas, chamadas metanogênicas. Esse processo é responsável pela formação principalmente dos gases metano e dióxido de carbono no aterro sanitário, o número de gases traços (menor que 1%), tipo e concentração dependerão da origem dos RSU (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993). O metano, principal componente do biogás, é formado por diferentes processos na crosta terrestre (SCHOELL, 1988), como por vulcões e falhas geológicas. O metano também pode ser encontrado na decomposição de resíduos orgânicos, em fontes naturais (pântanos, mangues, lagos) e extração de combustível mineral (juntamente com outros combustíveis hidrocarbonetos).

A composição do biogás inclui amônia ( $NH_3$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono (CO), hidrogênio ( $H_2$ ), sulfeto de hidrogênio ( $H_2S$ ), metano ( $CH_4$ ), nitrogênio ( $N_2$ ) e oxigênio ( $O_2$ ). O metano representa 45 a 70% do biogás, seguido pelo dióxido de carbono (40-60%), nitrogênio (2-5%), oxigênio (0.1-1%), e os demais com menos que 1% (TCHOBANOGLIOUS *et al.*, 1993).

O potencial energético do biogás está diretamente relacionado ao percentual de metano presente em sua composição, devido seu potencial calorífico. O poder calorífico inferior (P.C.I) do biogás é cerca de  $5.500 \text{ kcal/m}^3$  quando a proporção de metano é próxima de 60% (IANNICELLI, 2008). Visando alcançar maiores concentrações de metano na composição do biogás, são realizados beneficiamentos para o aumento da sua pureza (MILANEZ *et al.*, 2021). A tabela 1 compara diferentes combustíveis de amplo uso comercial e seus respectivos potenciais caloríficos.

Tabela 1: Comparativo do potencial calorífico entre diferentes combustíveis.

| Combustível | Poder Calorífico         |
|-------------|--------------------------|
| Biogás      | $5.500 \text{ kcal/m}^3$ |
| Metano      | $8.500 \text{ kcal/m}^3$ |
| Gás Natural | $9.400 \text{ kcal/kg}$  |
| Petróleo    | $10.900 \text{ kcal/kg}$ |
| Gasolina    | $11.230 \text{ kcal/kg}$ |

Fonte: adaptado de ALVES, 2000.

A produção do biogás, segundo Tchobanoglous *et al.* (1993), se dá mediante 5 fases ou etapas que ocorrem de forma mais ou menos sequenciais, sendo elas Fase I ou ajuste inicial, Fase II ou fase de transição, Fase III ou fase ácida, Fase IV ou metanogênese e Fase V ou fase de maturação, como demonstrado na figura 4.

Na fase I, os componentes orgânicos biodegradáveis nos resíduos sólidos urbanos começam a sofrer decomposição bacteriana logo após serem dispostos no aterro sanitário, inicialmente a decomposição ocorre em condições aeróbicas por conta da quantidade restante de oxigênio ainda preso no aterro.

Na fase II (fase de transição) acontece o esgotamento do oxigênio e então as condições anaeróbicas começam a se desenvolver, ocorrendo uma continuidade na queda do potencial de óxido-redução fazendo com que os microrganismos responsáveis pela conversão da matéria orgânica em metano e dióxido de carbono iniciem a conversão do material orgânico em ácidos orgânicos e outros produtos intermediários. Nessa fase o pH do chorume começa a cair, devido presença de ácidos orgânicos e por conta de elevadas concentrações de  $CO_2$ .

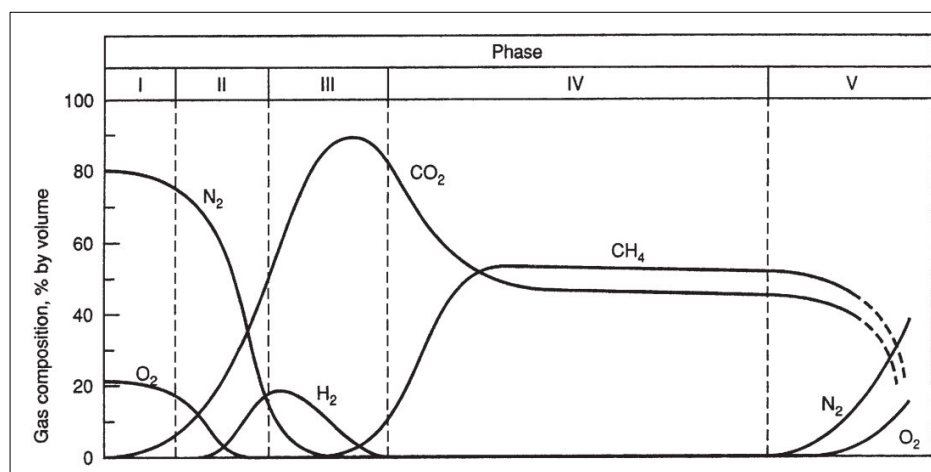
Seguindo para a fase ácida (Fase III), a atividade bacteriológica que iniciou na fase II é intensificada com a produção de altas quantidades de ácidos orgânicos e menores quantidades de gás hidrogênio. A primeira de um total de três etapas envolve a transformação mediada por enzima (hidrólise) de composto de massa molecular (por exemplo, lipídios, polímeros orgânicos e proteínas) em compostos adequados para uso por microrganismos como fonte de energias. A segunda etapa do processo se chama acidogênese e envolve a conversão microbiológica dos compostos produtos da hidrólise em compostos intermediários com massa molecular menor, como o ácido acético ( $CH_3COOH$ ) e pequenas concentrações de outros ácidos mais complexos. O principal gás formado durante a fase III é o dióxido de carbono ( $CO_2$ ) e os microrganismos envolvidos nessa conversão, descritos como não metanogênicos, são constituídos por bactérias anaeróbias estritas e facultativas.

A Demanda Bioquímica do Oxigênio (DBO) e a Demanda Química de Oxigênio (DQO) e a condutividade do chorume aumentam significativamente durante essa fase, devido à dissolução de ácidos orgânicos no chorume. Por conta do pH baixo, constituintes inorgânicos como metais pesados são solubilizados e passam a compor o chorume.

Na fase IV (Metanogênese), predominam microrganismos estritamente anaeróbios, chamados metanogênicos, sua função é converter ácido acético e gás hidrogênio em metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ). A produção do metano e dos ácidos acontece simultaneamente, embora haja uma redução considerável na taxa de formação dos ácidos. Nessa fase o pH do chorume tende a ser maior (mais básico), variando entre 6,8 e 8,0.

A fase V (Maturação), tem seu começo somente após grande parte do material orgânico já ter passado pelo processo de biodegradação e convertida em metano e dióxido de carbono, durante a fase IV. Nessa fase a taxa de produção de gás diminui consideravelmente, pois a maioria dos nutrientes já foram consumidos nas fases anteriores e os substratos remanescentes são de degradação lenta.

Figura 4: Fases de produção do biogás em aterros sanitários



Fonte: TCHOBANOGLOUS *et al.*, (1993).

É importante também considerar o tempo necessário para que cada estágio da formação do biogás ocorra, como apresentado na figura 5.

Figura 5: Tempo de cada fase para formação do biogás.

| Fases | Condição                          | Tempo Típico          |
|-------|-----------------------------------|-----------------------|
| I     | Aeróbia                           | Horas a 1 Semana      |
| II    | Ausência de Oxigênio              | 1 a 6 Meses           |
| III   | Anaeróbia, Metanogênica, Instável | 3 Meses a 3 Anos      |
| IV    | Anaeróbia, Metanogênica, Estável  | 8 a 40 Anos           |
| V     | Anaeróbia, Metanogênica, Declínio | 1 a acima de 40 Anos  |
| Total |                                   | 10 a acima de 80 Anos |

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous; Theisen; Vinil (1993).

### 2.3.3 Fatores controladores para produção do biogás

Segundo EMCON (1981), os principais fatores que interferem na produção do biogás em aterros sanitários são composição, umidade do resíduo, temperatura e pH do aterro. Como abordado a seguir:

- Composição: Quanto maior for o percentual de materiais biodegradáveis (material orgânico), maior será a taxa de produção de gases. Os resíduos sólidos destinados aos aterros podem apresentar uma composição variada ao longo do ano, dependendo do clima e dos hábitos de consumo da população local;
- Umidade: valores de umidade entre 60 e 90 % permite um aumento da geração de biogás no aterro. A construção de aterro com baixa permeabilidade para controle da formação do chorume, mantém a umidade no interior do aterro baixa e prejudica a formação de biogás;
- Temperatura do aterro: a temperatura tem efeito importante sobre o processo de produção do biogás, existem diferentes faixas de temperatura as quais a fermentação anaeróbia pode ser realizada: psicrófilas (<30°C), mesófilas (30-40°C) e termófilas (50-60°C). Contudo bactérias anaeróbicas são mais ativas na faixa de temperaturas mesófilas e termófilas. (MITAL, 1996; UMETSU *et al.*, 1992).
- pH do aterro: O pH ótimo para a produção do metano está entre 7.0 e 7.2. Inicialmente, os aterros apresentam pH ácido, que tende a aproximar-se da neutralidade a partir da fase metanogênica.

Levando em consideração tais fatores produtores de biogás, regiões com clima tropical (clima quente e úmido) tem destaque para produção de biogás no mundo.

## 2.4 Aterros sanitários

A Norma Brasileira (NBR) 8.419/1992 define aterro sanitário uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra após cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (ABNT, 1992).

### **2.4.1 Aspectos do aterro sanitário**

Um aterro sanitário deve ser equipado com características e sistemas projetados para melhor controlar variáveis que possam causar danos ao meio ambiente e à saúde pública. Essas incluem: um sistema de impermeabilização do solo, drenagem de águas pluviais, coleta de biogás, canalização e encaminhamento do lixiviado para tratamento, e cobertura diária da massa de resíduos com materiais específicos.

#### **2.4.1.1 Local de implantação do aterro sanitário**

De acordo com RECESA (2008) a escolha do local de instalação de um aterro sanitário deve obedecer a alguns critérios para melhor aproveitamento do aterro, para isso se deve considerar alguns fatores, como:

- Minimizar impactos ambientais, com escolhas de áreas sem restrições ambientais, manter distância de cursos d'água ou mananciais e residências. Utilizar material de cobertura com características específicas, apresentando baixa suscetibilidade a processos erosivos e deslizamentos de terra;
- Área que permita uma maior vida útil ao projeto, com capacidade máxima para armazenamento de RSU;
- Buscar diminuir os gastos com a execução do projeto, operação e manutenção, área com proximidade com a zona produtora de resíduos sólidos; local de retirada do material de cobertura no próprio local do aterro ou entorno.
- Aceitação da população circunvizinha, com menor rejeição possível por parte da comunidade diretamente afetada pelo empreendimento.

RECESA (2008), contempla que uma série de estudos deve preceder a escolha do local para instalação de um aterro sanitário. Dentre esses estudos temos: geologia, geotécnica e topografia do terreno, visando estudar o tipo e características do relevo, solo e rochas da região. Além disso, são realizados estudos hidrológicos e climatológicos, para conhecimento da existência ou não de aquíferos, profundidade de lençol freático, qualidade das águas subterrâneas, regime pluviométrico e dos ventos. Estudos arqueológicos visam identificar a existência de possíveis sítios de interesse arqueológico. Por fim, estudos socioeconômicos observam valor da terra, uso e ocupação dos terrenos, distância da área aos centros por ela atendidos, integração com as malhas viárias e grau de aceitabilidade da população.

#### 2.4.1.2 Impermeabilização

Visando a proteção contra a contaminação do subsolo por chorume, é necessário a realização de uma impermeabilização de fundo, para isso é utilizado uma camada de argila com baixa permeabilidade ( $k \leq 1 \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ ), com altura que varia conforme o projeto. A argila é compactada e revestida por geomembranas (sintético), com função de impedir o fluxo de poluentes para o solo e água subterrânea, executa-se outra camada de argila por cima da geomembrana com aproximada espessura de 50cm, visando a proteção da geomembrana contra ações mecânicas (GUEDES, 2007).

#### 2.4.1.3 Sistema de drenagem

O sistema de drenagem, situado no fundo do aterro sanitário, consiste na instalação de tubos perfurados revestidos com grânulos de solo de granulometria mais grossa em valas revestidas por geomembranas. O sistema de drenagem de águas pluviais visa reduzir a carga hidráulica no fundo do aterro, contribuindo para minimizar a formação de lixiviado e manter a estabilidade operacional do aterro, incluindo os taludes e o material de cobertura.

Existem dois principais sistemas de drenagem sendo sistemas colchão drenante e espinha de peixe, ambos devem ter um desnível topográfico para facilitar o escoamento, evitar a obstrução dos poros do sistema drenante por passagem de partículas finas e melhorar a captação do lixiviado para posterior tratamento (RECESA, 2008).

O sistema de drenagem para o biogás, produzido no interior da massa de resíduos, procura reduzir as pressões internas do aterro, além de coletar o biogás para posterior queima ou aproveitamento como combustível para geração de energia. Esse processo é realizado por meio de drenos verticais e horizontais, como tubos ou manilhas de concreto. Segundo a RECESA (2008), os drenos verticais são sempre conectados aos horizontais destinados ao lixiviado (chorume + percolado).

#### 2.4.1.4 *Camada de cobertura*

Consiste no cobrimento diário de resíduos ao fim da jornada de trabalho, deve ser realizado durante todos os anos de atividade do aterro sanitário, sua principal finalidade é ser isolante entre a massa de resíduo depositada e o ambiente externo, dessa forma minimizando a liberação de gás para a atmosfera e diminuindo a penetração da água da chuva para o interior do resíduo. Desse modo impedindo o aumento significativo da produção de lixiviado no aterro, consequentemente maior contaminação do subsolo e águas subterrâneas.

Lopes *et al.* (2010), afirma que as coberturas finais em climas árido e semiárido requerem configurações e especificações distintas das coberturas convencionais encontradas em aterros localizados em regiões de clima úmido. Isso se deve pela alta taxa de evaporação que resseca solos argilosos formando trincas, permitindo escape de biogás para a atmosfera.

#### 2.4.2 *Métodos de execução de aterros sanitários*

Segundo RECESA (2008), existem três métodos distintos de execução de um aterro sanitário. Estes dependem do seu porte e características topográficas, tipo de solo e profundidade do lençol freático. Sendo eles:

- **Método da Trincheira:** Normalmente empregado em terrenos planos, este método envolve a escavação de trincheiras ou valas no solo, com dimensões variáveis e adaptadas ao volume de resíduos produzido, de modo a permitir a operação dos equipamentos de aterramento. As dimensões da trincheira determinam os procedimentos construtivos, o modo de operação e os equipamentos a serem empregados. A compactação dos resíduos pode ser realizada manual ou mecanicamente, dependendo do tamanho da trincheira. Aterros em trincheira são indicados para comunidades de pequeno porte, pois podem ser operados manualmente.

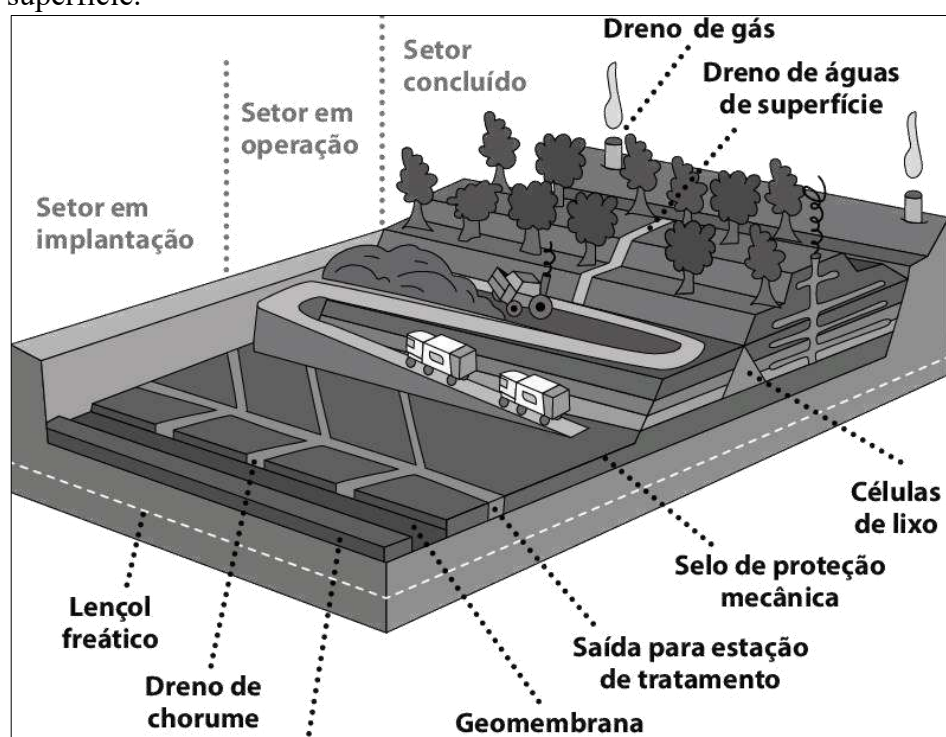
- **Método da área ou de Superfície:** Este método é utilizado em áreas cuja topografia é adequada para receber os resíduos diretamente sobre a superfície do solo, sem necessidade de modificação de sua configuração original. Consiste na criação de camadas de resíduos compactados, que são sobrepostas acima do nível original do



terreno. Os resíduos são descarregados, espalhados, compactados e cobertos diariamente, seguindo a mesma metodologia utilizada nos demais métodos. Este é o método utilizado no ASMOC (figura 6).

- **Métodos da Rampa, Encosta ou Depressão:** Normalmente, esses métodos são utilizados em regiões relativamente secas e planas, localizadas em meias encostas, onde a topografia é alterada por meio de terraplanagem. Isso envolve a construção de uma rampa na qual os resíduos são dispostos, formando células. O método compreende o aterramento aproveitando um talude, seja ele natural ou construído, onde os resíduos são compactados contra esse talude.

Figura 6: Esquema simplificado de aterro sanitário do método área ou superfície.



Fonte: PALERMO & GOMES, (2017).

## 2.5 Estudos geofísicos em aterros sanitários

Estudos envolvendo geofísica aplicada a aterros sanitários estão geralmente associadas a detecção e acompanhamento de plumas de contaminação por chorume (MOREIRA, 2009). O chorume se comporta como um bom condutor de eletricidade por ser um líquido rico em cátions e ânions livres, dessa forma apresenta baixos valores de resistividade em perfis de eletrorresistividade.

Oliveira *et al.*, (2011), utilizou o método geofísico da polarização induzida para caracterizar possíveis zonas de contaminação por chorume em uma área de lixão a céu aberto no município de Caçapava do Sul – RS. Foram realizados 8 perfis de caminhamento elétrico em uma vala com topografia inferior, foram feitas medidas de direção e sentido de 83 fraturas contidas em rochas que afloram na região dos perfis geofísicos. Como resultado, observou que a camada que continha resíduos sólidos apresentou baixos valores de cargabilidade, já zonas fraturadas preenchidas por fluidos, produzidos na decomposição do material orgânico presente nos resíduos, apresentaram anomalias verticais de baixa intensidade. Valores altos de cargabilidade em resíduos enterrados em zonas não saturadas (fora do lençol freático) podem ser atribuídos a presença de metais dissolvidos no chorume.

Laureano (2007) utilizou os métodos eletromagnético indutivo (EM-34), *Ground Penetrating Radar* (GPR) e método da eletrorresistividade por caminhamento elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo no aterro sanitário de Cuiabá-MT, buscando caracterizar zonas de contaminação próximas da lagoa de tratamento do chorume. Foram realizados 25 (vinte e cinco) perfis com EM-34, 2 (dois) perfis de eletrorresistividade e 2 (dois) perfis de GPR. Foram identificadas zonas de contaminação por chorume com valores de condutividade elétrica aparente maiores que  $100\text{mS/m}$  (EM-34) e zonas com resistividade elétrica menores que  $20\text{ ohm.m}$  chegando até  $1,8\text{ ohm.m}$  no caminhamento elétrico. O uso do GPR possibilitou visualizar zonas contaminadas por chorume, principalmente em profundidades maiores que 14 metros. O estudo concluiu que a contaminação estava concentrada a 30 metros de profundidade, contudo houve evidências de contaminação em zonas de até 60 metros de profundidade.

Bortolin (2009), utilizou o método geofísico da eletrorresistividade em um aterro controlado de Rio Claro – SP, realizando 09 perfis de sondagem elétrica vertical (SEV) e 08 perfis de imageamento elétrico (IE), como resultado caracterizou possíveis zonas de contaminação do subsolo por chorume, com sentido de fluxo na direção sudoeste do aterro controlado. Zonas de baixas resistividade, com valores menores ou iguais a  $50\text{ohm.m}$  foram associados à contaminação por chorume.

Georgaki *et al.*, (2008), realizou perfis de ERT (Electrical Resistivity Tomography) no aterro sanitário de Pera Galini, localizado na ilha de Creta, sul da Grécia. O objetivo desse estudo consistiu em avaliar o uso da eletrorresistividade para otimizar a

estimativa das taxas de emissão de metano ( $CH_4$ ) e dióxido de carbono ( $CO_2$ ) em aterros sanitários. Foram realizados ao todo 15 perfis, dos quais nove no aterro em si e seis ao seu entorno. Ao realizar testes com o arranjo dipolo-dipolo e Wenner–Schlumberger para a aquisição, optou-se por utilizar do arranjo dipolo-dipolo pois permite maior definição resistividade aparente em subsuperfície. Foram utilizados espaçamentos dos eletrodos de 2 e 5 metros, analisando profundidades teóricas de cerca de 40 metros.

Os resíduos foram classificados em quatro tipos, considerando o valor de resistividade, sendo resíduos orgânicos saturados em lixiviado, resíduos orgânicos, resíduos com baixo teor orgânico e resíduos não orgânicos conforme a tabela 2.2. Para tal, utilizou-se dos valores de resistividade adquiridos através dos perfis geofísicos, análises de resíduos/substrato rochoso obtidos a partir de furos de sondagem geotécnica no aterro, análises químicas do solo, solo saturado com lixiviado e amostras de lixiviado retiradas em diversas partes do aterro.

Tabela 2: Classificação das camadas geoeletricas no aterro sanitário de Pera Galini e seus respectivos valores de resistividades.

| Tipo de Material                          | Resistividade ( <i>Ohm.m</i> ) |
|-------------------------------------------|--------------------------------|
| Resíduos Orgânicos saturados em lixiviado | 0.21 a 4.00                    |
| Resíduos Orgânicos                        | 4.00 a 20.00                   |
| Resíduos com baixo teor orgânico          | 20.00 a 50.00                  |
| Resíduos não orgânicos                    | Acima de 50.00                 |

Fonte: adaptado de Georgaki *et al.*, (2008).

Georgaki *et al.*, (2008), realizou medidas das taxas de emissão de gases em 5 (cinco) pontos distintos sobre 2 (dois) perfis de tomografia elétrica 2D (ERT), permitindo correlacionar o tipo de resíduo e suas espessuras com as taxas de emissão de gases, dessa forma observou que resíduos orgânicos mais recentes apresentam maiores taxas de geração biogás. O método da geofísica pode fornecer uma identificação relativa da natureza dos resíduos, distinguindo entre material orgânico e inorgânico, contudo não é capaz de estimar o estado físico real da fração orgânica, se ainda é gerador de biogás ou se já foi estabilizada em húmus. Por fim, o trabalho conclui que é possível utilizar o método da eletrorresistividade para distinguir áreas de alto e baixo fluxo de emissão de gases dentro do aterro, permitindo uma melhor estimativa para local pontos de coletas de gases, diminuindo gastos com pontos escolhidos de forma aleatória.

Moreira *et al.*, (2015) utilizou o método da eletrorresistividade para caracterizar zonas com acúmulo de biogás, por meio de medições de resistividade elétrica na camada de resíduos não saturados e cruzamento com medidas diretas do fluxo de biogás, no aterro sanitário de Rio Claro-SP. Foi utilizado o arranjo Schlumberger para adquirir 13 perfis de tomografia de resistividade elétrica (ERT) com 60 metros de comprimento e espaçamento de 1,5m entre os eletrodos alcançando 9 metros de profundidade.

As linhas de aquisição geofísica foram realizadas na proximidade com os drenos emissores de biogás. O estudo observou que drenos com maiores vazões atravessaram zonas de maior resistividade variando entre 141 e 58 *ohm.m* e drenos com menores vazões apresentaram valores de resistividade variando entre 141 *ohm.m* nas profundidades mais rasas e 0,3 *ohm.m* após 4 metros de profundidade. Indicando uma forte correlação entre altos valores de resistividade e existência de biogás.

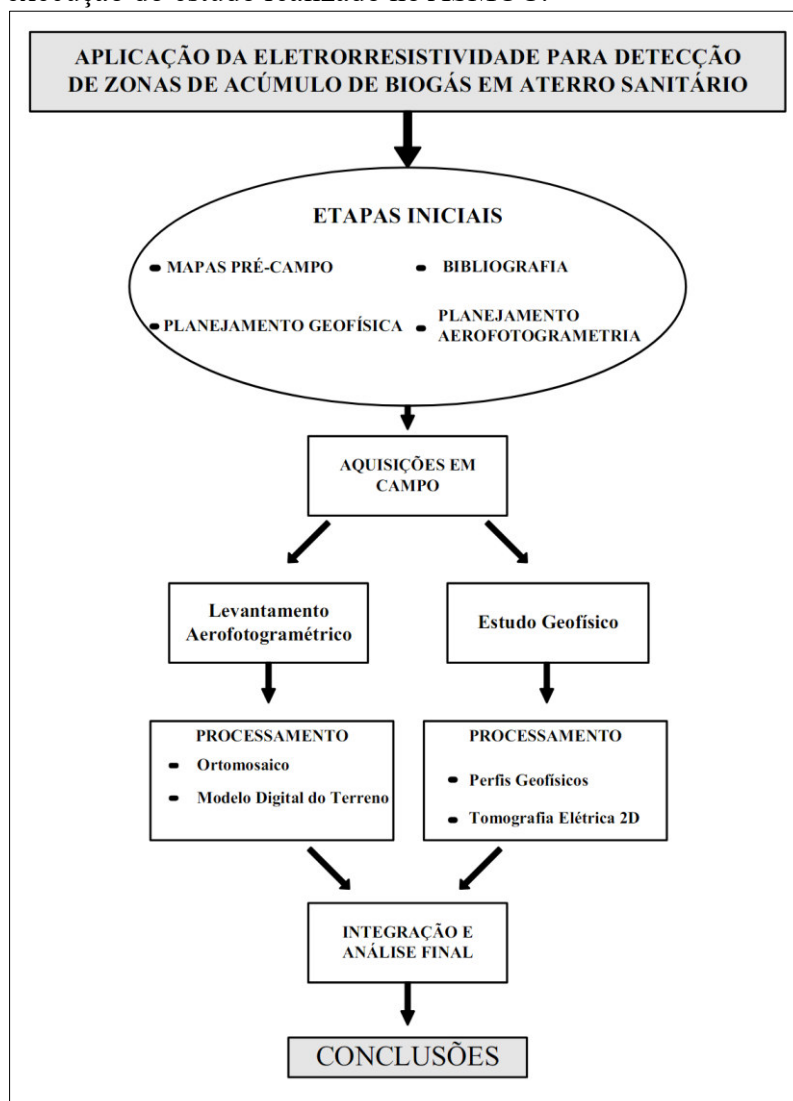
Áreas de alta resistividade devem caracterizar zonas de acúmulo de biogás, cuja sua presença nos espaços vazios dos resíduos é maior que a presença de chorume resultando em um aumento da resistividade, atribuído ao caráter isolante dos gases à passagem de corrente elétrica (Moreira *et al.*, 2015). A decomposição da matéria orgânica também produz lixiviados e os intervalos de baixos valores de resistividade podem refletir zonas de acúmulo destes. O trabalho concluiu que a análise da resistividade elétrica do aterro e comparação com as vazões disponíveis, permitem a identificação de novos pontos potencialmente eficazes para perfuração e instalação de drenos para coleta de biogás.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Considerações iniciais**

Para a realização do presente estudo, foram seguidas etapas sequenciais como demonstra o fluxograma da figura 7, buscando uma maior organização dos levantamentos e informações para elaboração da pesquisa em questão. As etapas iniciais consistiram em pesquisas para subsídio teórico do projeto e utilização de informações bibliográficas de diferentes autores sobre o tema e região de interesse. Além disso, foram realizados planejamentos para a etapa de aquisição de dados em campo.

Figura 7: Fluxograma representativo de etapas realizadas para execução do estudo realizado no ASMOC.



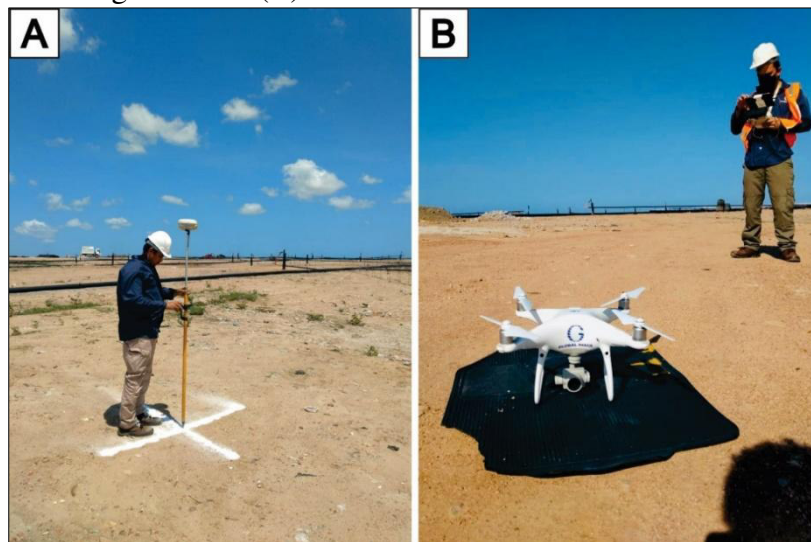
Fonte: autor.

Para a realização da etapa de campo foram utilizadas duas metodologias, sendo uma a aplicação do método geofísico da eletrorresistividade e outra o levantamento aerofotogramétrico da área, permitindo assim uma precisão topográfica acurada, além de contribuir para a integração dos produtos finais. Por fim, a GNR FORTALEZA VALORIZAÇÃO DE BIOGÁS LTDA, atual administração da produção de biogás, forneceu dados de vazão dos poços de captação realizados durante os meses de janeiro, fevereiro e março de 2021, período das aquisições geofísicas. As informações cedidas das vazões serão utilizadas para uma visão ampla (melhor entendimento) dos poços com maior produção de biogás no referido aterro sanitário.

### 3.2 Levantamento aerofotogramétrico

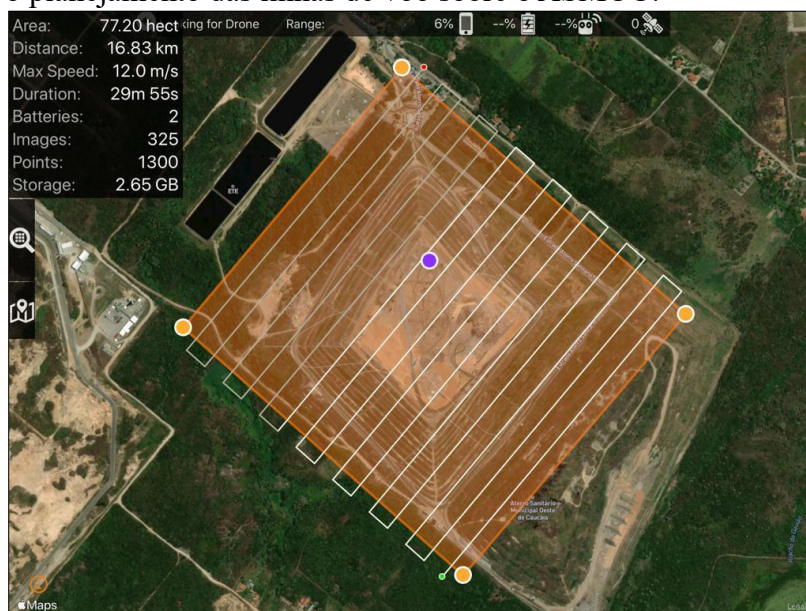
O levantamento aerofotogramétrico foi realizado a partir de imagens retiradas pelo drone *Phantom 4 pro*, produzido pela DJI, enquanto os pontos de controle para correção topográfica foram coletados a partir do receptor GNSS (*Global Navigation Satellite System*) Trimble R4 no modo RTK (*Real Time Kinematic*), demonstrado na figura 8. O planejamento e execução de voo foram realizados no aplicativo *Map Pilot* disponível para o sistema IOS (figura 9). Este aplicativo permite ao usuário o planejamento pela inserção de linhas de voo, tendo em vista as seguintes informações: altitude de voo, velocidade, tempo de voo, captura das fotos, sobreposição das imagens, entre outros parâmetros.

Figura 8: Aquisição dos pontos de controle (A) e levantamento aerofotogramétrico (B) no ASMOC.



Fonte: autor.

Figura 9: Detalhes da interface do software *map pilot* exibindo o planejamento das linhas de voo sobre o ASMOC.



Fonte: programa *map pilot*.

O voo foi executado no modo *grid*, com apenas uma direção principal (NE), de maneira que as imagens foram adquiridas na continuidade de todas as estruturas presentes evitando e diminuindo distorções dos produtos de interesse, (ortomosaico e modelo digital de terreno). A tabela 3 contém a síntese dos parâmetros básicos para o planejamento e execução do voo principal.

Tabela 3: Síntese dos parâmetros utilizados durante o levantamento aerofotogramétrico no ASMOC

| Parâmetros                | Voo Principal  |
|---------------------------|----------------|
| Velocidade máxima         | 12 m/s         |
| Tempo de voo estimado     | 29:55 minutos  |
| Altitude                  | 200 m          |
| Área total                | 77,20 Hectares |
| Linhas de Voo             | 15             |
| Recobrimento Lateral      | 80%            |
| Recobrimento Longitudinal | 70%            |

Fonte: autor.



A aquisição das imagens e pontos de controle para realização do levantamento aerofotogramétrico foi realizada no dia 17 de fevereiro de 2021. Na ocasião foram capturadas 364 imagens que abrangem todo o terreno alvo da pesquisa. Além disso, foram coletados 27 (vinte e sete) pontos de controle distribuídos regularmente em todo o terreno do aterro, sendo georreferenciados com o *Trimble R4* e utilizados na aerofotogrametria, (figura 3.2A).

Os pontos de controle são marcos utilizados para estabelecer a relação entre o sistema de coordenadas das imagens aéreas e o sistema de coordenadas do terreno, servindo como referência durante o processamento das imagens, visando aumentar a precisão dos produtos finais, como o ortomosaico e o modelo digital de terreno (MDT). Foram escolhidos alvos artificiais, que consistiram em marcações brancas em forma de "X" feitas com pó de cal.

Após a etapa de coleta de dados em campo, seguiu-se a execução do processamento dessas informações adquiridas. Nesse contexto, optou-se pela utilização do software *Agisoft Metashape Professional*, o qual desempenhou o papel de integrar e processar os dados, além de gerar os produtos resultantes da aerofotogrametria, foi utilizado o DATUM SIRGAS 2000, sistema de coordenadas UTM zona 24S.

### **3.3 Fundamentação teórica do método geofísico**

Dentre os principais métodos geofísicos de prospecção, da parte mais rasa da crosta terrestre, destacam-se os métodos geoeletricos, os quais são fundamentados nos campos elétricos e eletromagnéticos. As rochas, ou materiais de forma geral, em função de suas composições químicas, texturas e disposições, apresentam propriedades elétricas distintas, como resistividade, permeabilidade magnética, constante dielétrica, etc. O grupo dos métodos geoeletricos é composto pelos métodos da eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo, radar de penetração do solo (GPR) e eletromagnético (Braga, 1999). O presente trabalho utilizou-se do método da eletrorresistividade, técnica tomografia elétrica e arranjo dipolo-dipolo para desenvolvimento da pesquisa.



### 3.3.1 Método da eletrorresistividade

O método da eletrorresistividade é um das técnicas mais antigas de levantamento geofísico, seu objetivo consiste na determinação da distribuição da resistividade em subsuperfície através de medições realizadas na superfície do solo. A partir dessas medições a resistividade verdadeira da subsuperfície pode ser estimada. Resistividade é a dificuldade que uma corrente elétrica encontra para atravessar um determinado material ou corpo, quando submetido a uma tensão elétrica. Sendo a resistividade inversamente proporcional a condutividade, a resistividade é designada por ( $\rho$ ) com unidade *ohm.m* e a condutividade ( $\sigma$ ) dada em *S/m*, desse modo:  $\rho = 1/\sigma$ .

A aplicação do método da eletrorresistividade se dá através da injeção de corrente elétrica ( $I$ ), por um equipamento (eletrorresistivímetro), através dos eletrodos de corrente, chamados de A e B, e a medição da diferença de potencial ( $\Delta V$ ) por eletrodos de potencial, M e N.

O valor resultante da diferença de potencial  $\Delta V$  e da corrente elétrica é função da resistividade do solo ( $\rho$ ) e do arranjo geométrico dos eletrodos ( $K$ ), sendo a profundidade de estudo diretamente proporcional ao espaçamento entre os eletrodos (ORELLANA, 1972). Portanto, a resistividade é caracterizada pela equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Onde  $K$  é o fator geométrico, que depende da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, desse modo varia conforme o arranjo utilizado para a aquisição geofísica.

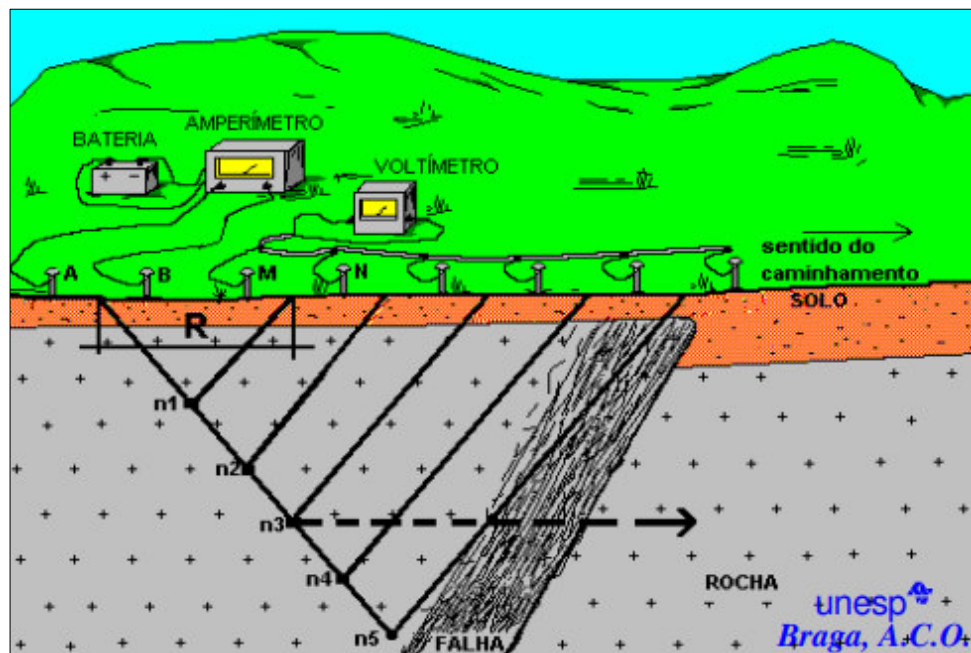
As técnicas de aquisição possíveis para a eletrorresistividade são a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), Caminhamento Elétrico (CE) também chamado de Tomografia Elétrica (ERT), por fim temos a Perfilagem Elétrica (PERF). Além disso, tem-se os arranjos, que correspondem à disposição dos eletrodos na superfície do terreno (Dipolo-Dipolo, Wenner, Schlumberger, etc). A aquisição da resistividade aparente do subsolo pode ser realizada através da combinação de uma das três técnicas com um dos diversos arranjos propostos para o método da eletrorresistividade (Braga, 1999).

A SEV é realizada em investigações verticais das variações de um parâmetro físico em relação a profundidade, executadas em um único ponto na superfície do terreno, já a Tomografia Elétrica (ERT) é utilizada para leituras laterais da variação da resistividade, a uma ou várias profundidades determinadas, realizadas na superfície do

terreno. A perfilagem elétrica investiga lateralmente e verticalmente as variações de um parâmetro físico, são realizadas em interiores de furos de sondagem.

O Caminhamento Elétrico (CE) ou Tomografia Elétrica (ERT) permite investigar a variação de valores de resistividade ao longo de um perfil horizontal a uma ou mais profundidades determinadas (figura 10). Os eletrodos mudam de posição de forma simétrica a partir de um centro fixo, as profundidades de investigação aumentam com o distanciamento entre os eletrodos de corrente, os dipolos são deslocados a uma distância  $X$  e são feitas novas leituras nos níveis de investigação ( $n1$ ,  $n2$ ,  $n3$ , etc), permitindo gerar uma seção de resistividade elétrica com leituras tanto horizontais como em profundidade.

Figura 10: Esquema de aquisição geofísica utilizando a técnica da tomografia elétrica.



Fonte: Braga, 1999.

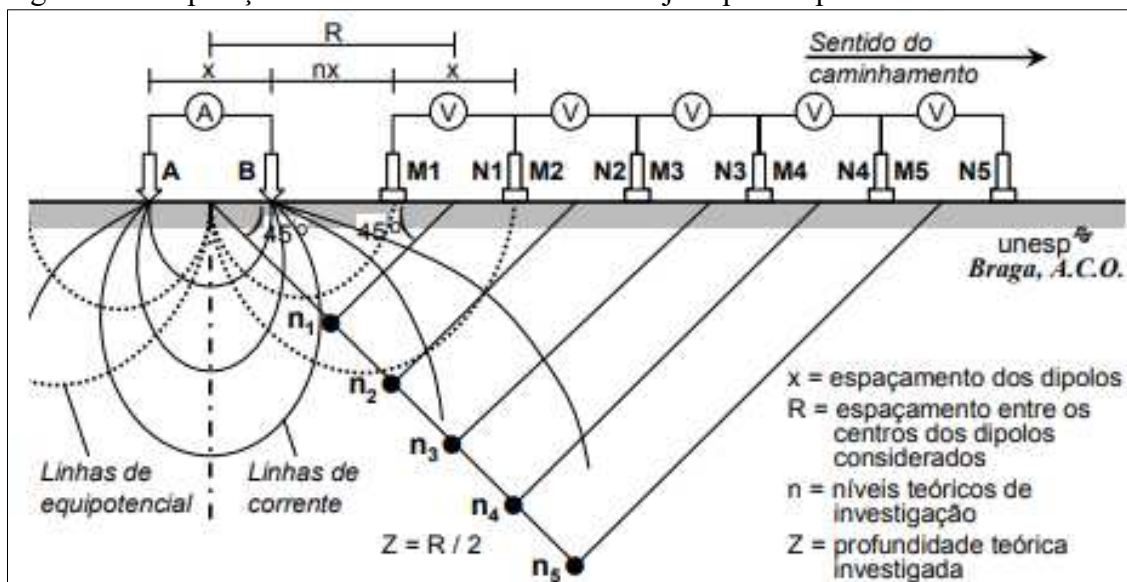
A escolha do arranjo na aquisição geofísica depende de alguns fatores, como o tipo de alvo, geometria do corpo, profundidade de investigação. Alguns arranjos podem favorecer estruturas horizontalizadas ou verticalizadas.

### 3.3.2 Arranjo Dipolo-Dipolo

Para levantamentos utilizando a técnica do caminhamento elétrico (CE) um dos métodos mais tradicionais e importantes é o arranjo dipolo-dipolo (Braga, 1999). Uma de suas vantagens é a possibilidade do estudo da variação lateral da resistividade em diferentes níveis de profundidade, permitindo a caracterização horizontal e vertical dos materiais em subsuperfície. Segundo Ward (1990), o arranjo dipolo-dipolo permite distinguir variações laterais com maior precisão que os arranjos Wenner e Schlumberger.

No arranjo dipolo-dipolo (figura 11) o espaçamento entre os eletrodos A-B e M-N é o mesmo, e o centro dos dipolos ABMN não permanece fixo durante toda a aquisição, deslocando-se ao longo do perfil proposto. O espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se varios dipolos MN ao longo da linha, cada dipolo MN se refere a um nível de investigação.

Figura 11: Disposição inicial dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo no CE.



Fonte: Braga, 2006.

Cada par de dipolos MN, em relação ao dipolo AB, representa um nível de investigação (profundidade teórica investigada). Portanto, quanto mais dipolos de MN forem instalados, maior será a profundidade de investigação. O ponto de atribuição da leitura realizada é dado como sendo o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de 45° a partir do centro dos dipolos.

O fator geométrico para o arranjo dipolo-dipolo é considerado sendo:

$$K=2\pi \cdot G \cdot x, \text{ sendo } G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}}$$

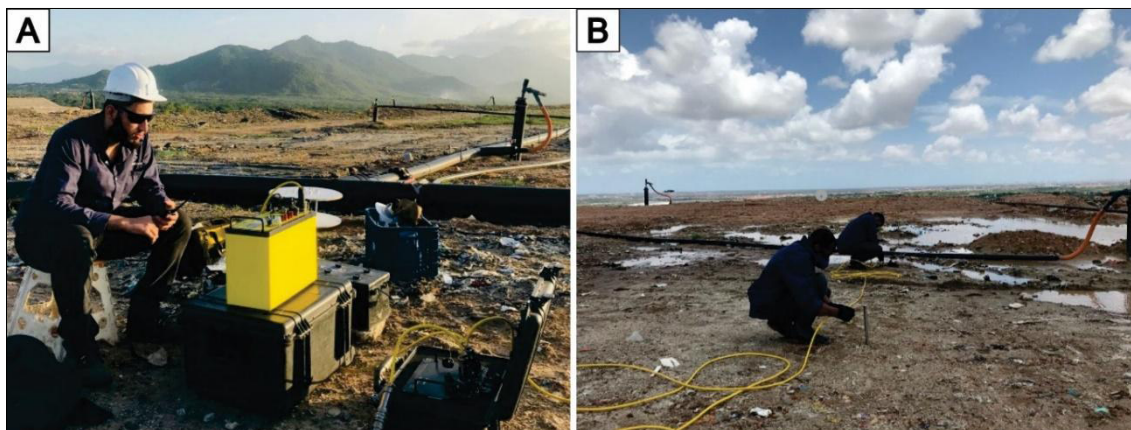
portanto: K = fator geométrico, depende da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, x = espaçamento dos dipolos AB e MN adotado e n = nível de investigação correspondente.

### 3.4 Aquisição dos dados ERT

A etapa de aquisição geofísica ocorreu entre os dias 13 de fevereiro e 16 de março de 2021, durante esse período foram realizados 8 (oito) perfis de tomografia elétrica (figura 12).

O equipamento utilizado para aplicar o método geofísico foi o *Super StingR8* ip pertencente a fabricante norte americana *AGI Advanced Geosciences, inc.*, equipamento de eletrorresistividade com até 8 canais receptores, possibilitando a aquisição de milhares de valores de resistividade em tempo de aquisição curto e automatizado, aumentando assim a resolução de investigação da subsuperfície. Em janeiro de 2020, o equipamento passou por uma calibragem nos Estados Unidos e apresenta seu certificado de calibração.

Figura 12: Imagens de aquisição em campo, a figura A) demonstra a etapa de aquisição com o equipamento já em operação automatizada, a figura B) representa os operadores conectando os eletrodos ao cabo multieletrodo.



Fonte: autor.

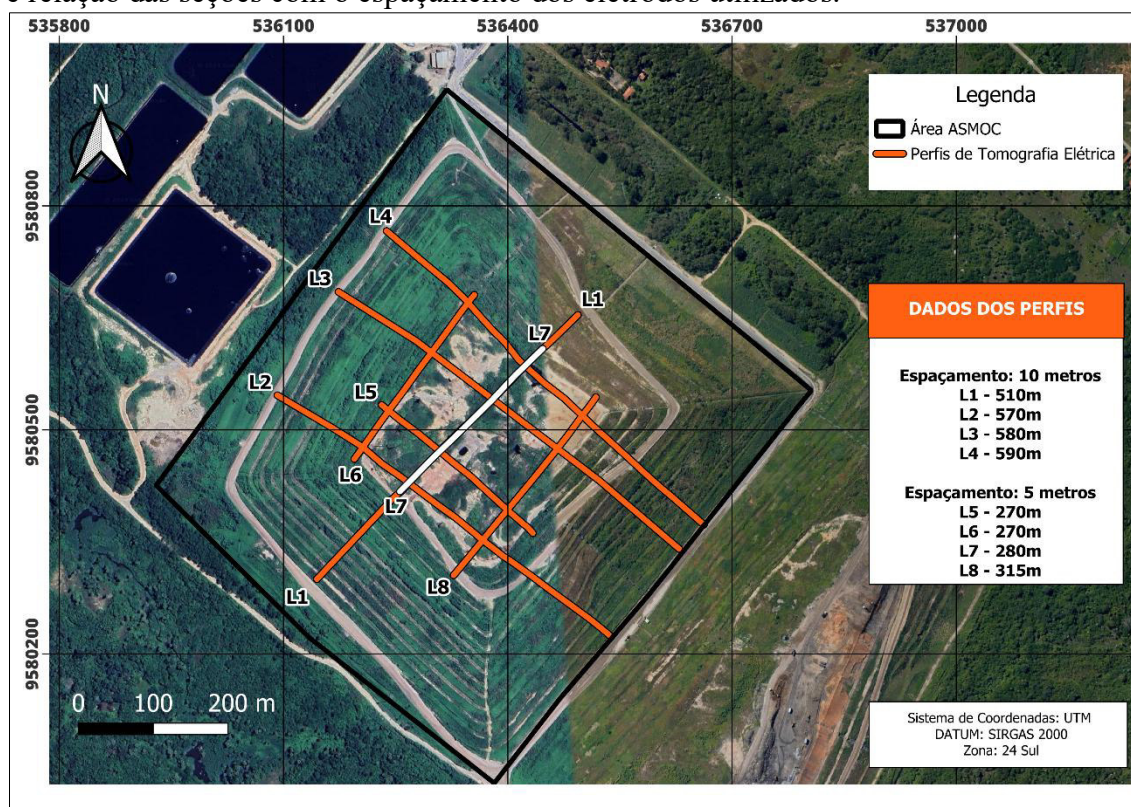
Os perfis geofísicos foram concentrados principalmente na região central das células de resíduos, onde há uma tendência natural de concentração do biogás, possibilitando analisar todas as camadas da base ao topo do aterro. Os ensaios foram



realizados ao longo de 8 (oito) linhas de investigação utilizando o método da Tomografia Elétrica (ERT), totalizando 3.385 metros adquiridos.

Todos os perfis realizados utilizaram o arranjo dipolo-dipolo, os perfis L1, L2, L3 e L4 tiveram espaçamento de eletrodos de 10 metros, já os perfis L5, L6, L7, L8 foram realizados com espaçamento de 5 metros entre os eletrodos, essa mudança de espaçamento se deu pela procura em aumentar o grau de detalhamento do estudo geofísico, realizando perfis mais rasos e com maior detalhamento do topo do aterro sanitário. A figura 13 possibilita melhor compreensão da disposição dos perfis na área.

Figura 13: Mapa demonstrando as posições das seções geofísicas realizadas no ASMOC e relação das seções com o espaçamento dos eletrodos utilizados.



Fonte: autor.

### 3.5 Processamento e integração de dados

Após a aquisição dos perfis geoeletricos, iniciou-se a etapa de organização, análise e processamento dos dados. Para tal, foi utilizado o *software EarthImager2D*, para modelagem e inversão. Durante esta etapa foram aplicados filtros e parâmetros buscando retirar possíveis ruídos existentes e manter a qualidade final dos produtos (menor erro RMS possível).

Após a etapa de processamento dos dados e obtenção dos modelos 2D de resistividade, foi utilizado o *software Leapfrog* para a elaboração de um modelo 3D da área de estudo. Esta visualização em ambiente tridimensional busca integrar o espaço físico do ASMOC com a disposição final dos perfis de tomografia elétrica permitindo um melhor entendimento da disposição dos estratos e anomalias geoeletricas presentes na área.

Os valores de vazões dos poços de captação de biogás do ASMOC, fornecidos pela empresa GNR, foram tratados utilizando o software de análise espacial *Surfer*. As informações foram utilizadas para a criação de mapas digitais que permitiram a distribuição de dados dispostos no espaço do aterro sanitário. Para isso, realizou-se o método de interpolação por krigagem, técnica de interpolação espacial que permite prever valores em locais não medidos com base em dados coletados em locais próximos.

Foram utilizados dados de vazão dos poços de captação de biogás referentes aos meses de janeiro, fevereiro e março de 2021, os dados apresentaram as médias das vazões para cada mês em m<sup>3</sup>/h.

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1 Aerofotogrametria**

Durante a etapa de aquisição dos dados aerofotogramétricos foram adquiridas 342 (trezentas e quarenta e duas) aerofotos permitindo uma cobertura de área com aproximadamente 130 (cento e trinta) hectares. Desta forma foi contemplado todo o aterro sanitário e seu entorno, evitando efeitos de borda (deformações espaciais que podem ocorrer nas extremidades dos produtos da aerofotogrametria). Os produtos gerados através do levantamento, utilizados nesta pesquisa foram: i) Modelo Digital do Terreno (MDT); e ii) Ortomosaico. Ambos gerados em alta resolução e com precisão topográfica centimétrica, conforme expresso no relatório de processamento extraído do *software metashape* (figura 14).

Figura 14: Precisão topográfica dos produtos da aerofotogrametria.

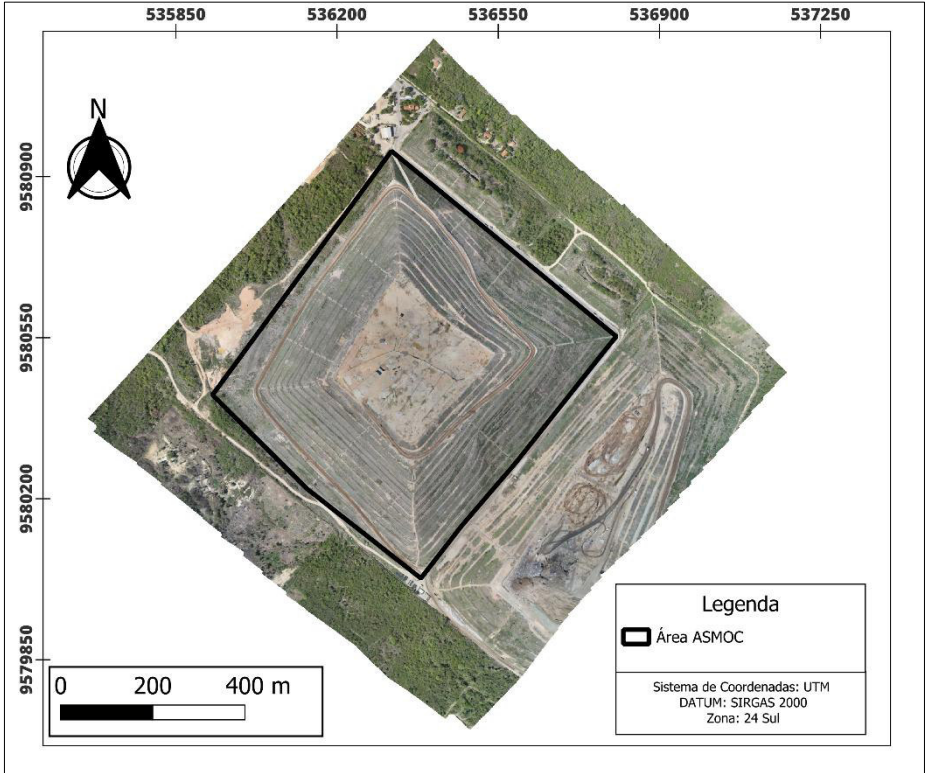
| Número | X error (cm) | Y error (cm) | Z error (cm) | XY error (cm) | Total (cm) |
|--------|--------------|--------------|--------------|---------------|------------|
| 21     | 2.27613      | 2.37414      | 1.76285      | 3.28897       | 3.73161    |

Table 4. Control points RMSE.  
X - Easting, Y - Northing, Z - Altitude.

Fonte: *software metashape*.

O ortomosaico (figura 15) possibilitou uma melhor visualização e compreensão da disposição espacial do aterro sanitário, com alta escala de detalhe (resolução de 6cm/px). Desta maneira, contribuindo para o planejamento da aquisição geofísica através do auxílio para localização dos perfis geofísicos em campo. Ademais, o ortomosaico foi crucial para a confecção de mapas integrando os perfis geofísicos realizados na área de estudo.

Figura 15: Ortomosaico do ASMOC.

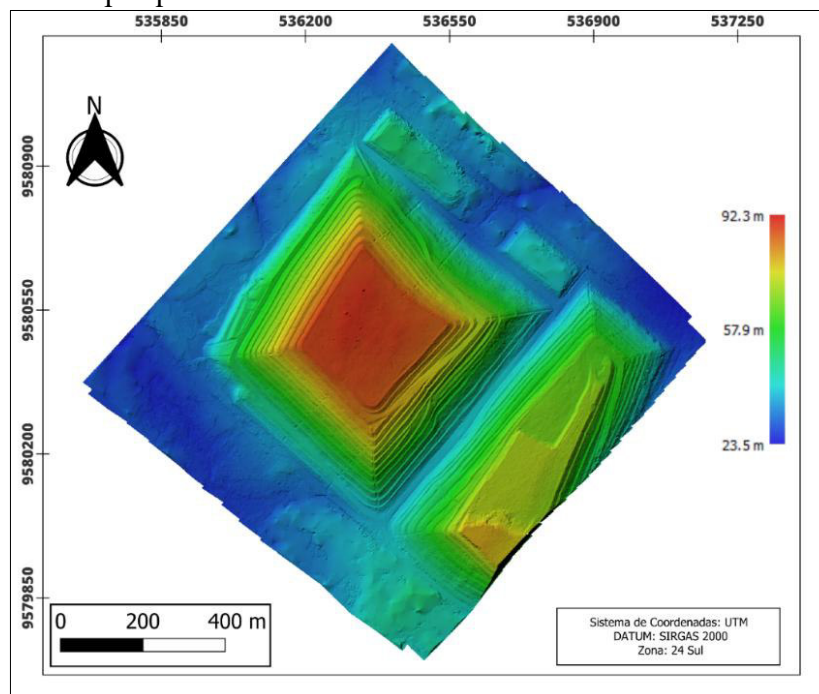


Fonte: autor.

Outro importante produto gerado através do levantamento aerofotogramétrico foi o Modelo Digital do Terreno (MDT). Este permitiu observar as estruturas que compõem o aterro e seus diferentes níveis topográficos. O MDT (figura 16) foi utilizado para elaboração de um modelo 3D da superfície do aterro e integração com os perfis de

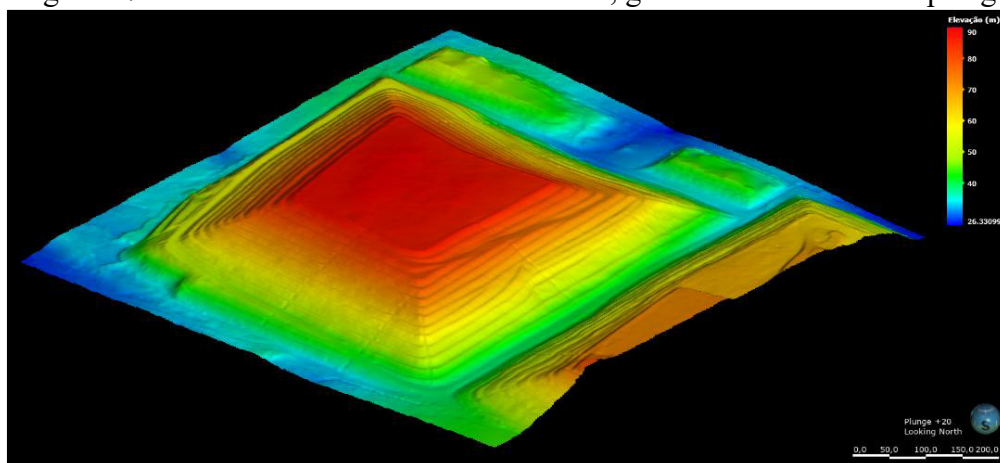
inversão geofísica, facilitando a visualização e compreensão do comportamento geoeletricos presente no ASMOC (figura 17).

Figura 16: Modelo Digital do Terreno (MDT) elaborado para área de pesquisa e seu entorno.



Fonte: autor.

Figura 17: Modelo tridimensional do ASMOC, gerado no software Leapfrog.



Fonte: autor.



## 4.2 Poços de captação de biogás

Conforme citado anteriormente, a GNR ENGENHARIA forneceu informações referentes aos valores da vazão média mensal apresentados nos poços de captação de biogás do aterro sanitário ASMOC nos meses de janeiro, fevereiro e março de 2021. Cada mês apresentou valores diferentes para números de poços, vazão média máxima e número de poços com vazão média zero, conforme consta na tabela 4:

Tabela 4: Informações dos poços de captação de biogás do ASMOC.

| Mês       | Qtd. Poços | Poços c/ vazão zero | Maior vazão (m³/h) | Vazão média total (m³/h) |
|-----------|------------|---------------------|--------------------|--------------------------|
| Janeiro   | 301        | 99                  | 240                | 4.415,6                  |
| Fevereiro | 314        | 89                  | 101                | 4.196,4                  |
| Março     | 318        | 160                 | 186,6              | 2.897,2                  |

Fonte: elaborado pelo autor.

Foi consultado valores de pluviosidade para o município de Caucaia-CE, referente aos meses de dezembro de 2020, janeiro, fevereiro e março de 2021. Conforme a FUNCEME, os valores apresentados foram:

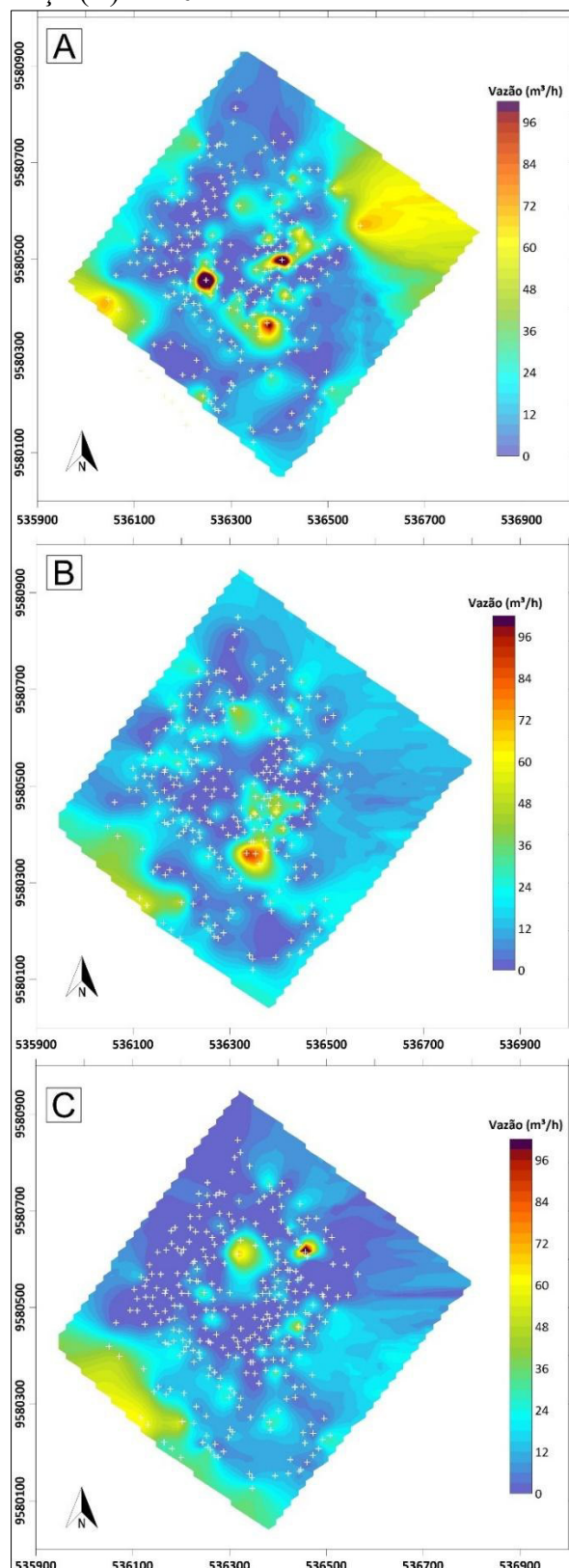
- Dezembro: 5,4mm
- Janeiro: 114,2mm
- Fevereiro: 55mm
- Março: 536,8mm

A partir da análise das pluviosidades mensais, foi possível observar dois aumentos significativos que ocorre entre os meses de dezembro e janeiro e os meses fevereiro e março.

O aumento da pluviosidade de dezembro para janeiro marca o fim da estação seca e começo da estação chuvosa em Caucaia-CE, desse modo aumentando a umidade e consequente aumento na produção de biogás evidenciado pelas altas vazões de janeiro e fevereiro. Contudo, mesmo com altos índices de precipitação, o mês de março evidencia uma queda nas vazões de biogás, podendo estar relacionado com uma estabilização da produção de biogás após o aumento de umidade ocorrida em janeiro. A partir dos valores de vazões médias dos poços de captação, foram realizados mapas de interpolação

utilizando o programa de modelagem e visualização de dados geoespaciais *Surfer*, conforme a figura 18.

Figura 18: Ilustração comparativa entre as interpolações geradas para os meses de janeiro (A), fevereiro (B) e março (C) de 2021.



Fonte: autor.

A partir da análise da interpolação das vazões médias dos poços de captação para os meses janeiro, fevereiro e março podemos citar as seguintes observações:

- i)* As vazões dos poços sofreram mudanças significativas em um intervalo de um mês, evidenciado na diferença de vazão abrupta entre fevereiro e março. Fatores como temperatura e aumento de umidade (aumento da pluviosidade) ocasionados pela mudança de estação contribuíram para tal variação.
- ii)* Os poços com maior produção se concentram na região central do aterro sanitário, estando localizados na parte mais elevada do mesmo, evidenciando que a maior captação de biogás pode estar relacionada com zonas de maior espessura de RSU acumulado no aterro sanitário;
- iii)* Há uma queda de 31% na vazão do aterro de fevereiro para março, podendo estar associado à estabilização da umidade no interior do aterro e equilíbrio produtivo atingido após dois meses de alta produção de biogás causados pelo aumento da umidade pelo período de chuva.

#### 4.3 Geofísica aplicada

Após a rotina de processamento dos dados, seguiu-se a etapa de análise e interpretação das seções de tomografia elétrica. Os resultados desta etapa serão apresentados seguindo a ordem conforme o espaçamento entre os eletrodos.

O arranjo dipolo-dipolo exibiu um excelente resultado, em termos de resolução lateral e vertical dos valores de resistividade aparente, permitindo uma melhor análise do comportamento geoeletrico das camadas existentes no aterro sanitário. Além disso, considerando um equipamento geofísico multicanal de aquisição semiautomática como no caso do equipamento utilizado nesse trabalho, o arranjo dipolo-dipolo apresenta maior velocidade de aquisição e maior produção em campo pois utiliza todos os canais do equipamento.

Tomando como parâmetro os trabalhos de Moreira *et al* (2015) e Georgaki *et al.*, (2008), foi utilizado o valor de 50 ohm.m para o valor máximo apresentado na escala das inversões, buscando realçar feições geoeletricas do aterro sanitário. Dessa forma, valores superiores a 50 ohm.m se apresentaram com coloração vermelha intensa na seção

geofísica. Portanto, permitindo dispor todos os perfis em uma mesma escala de resistividade facilitando a interpretação e caracterização de anomalias nos perfis.

As seções L5 a L8 foram realizadas com espaçamentos de 5 metros entre os eletrodos, o comprimento linear desses perfis alcançou entre 265 metros (L5 e L6) e 310 metros (L8) limitados pelo espaço físico disponível no topo do aterro sanitário. Em relação a profundidade, chegou-se em média a 60 (sessenta) metros de investigação para estas seções.

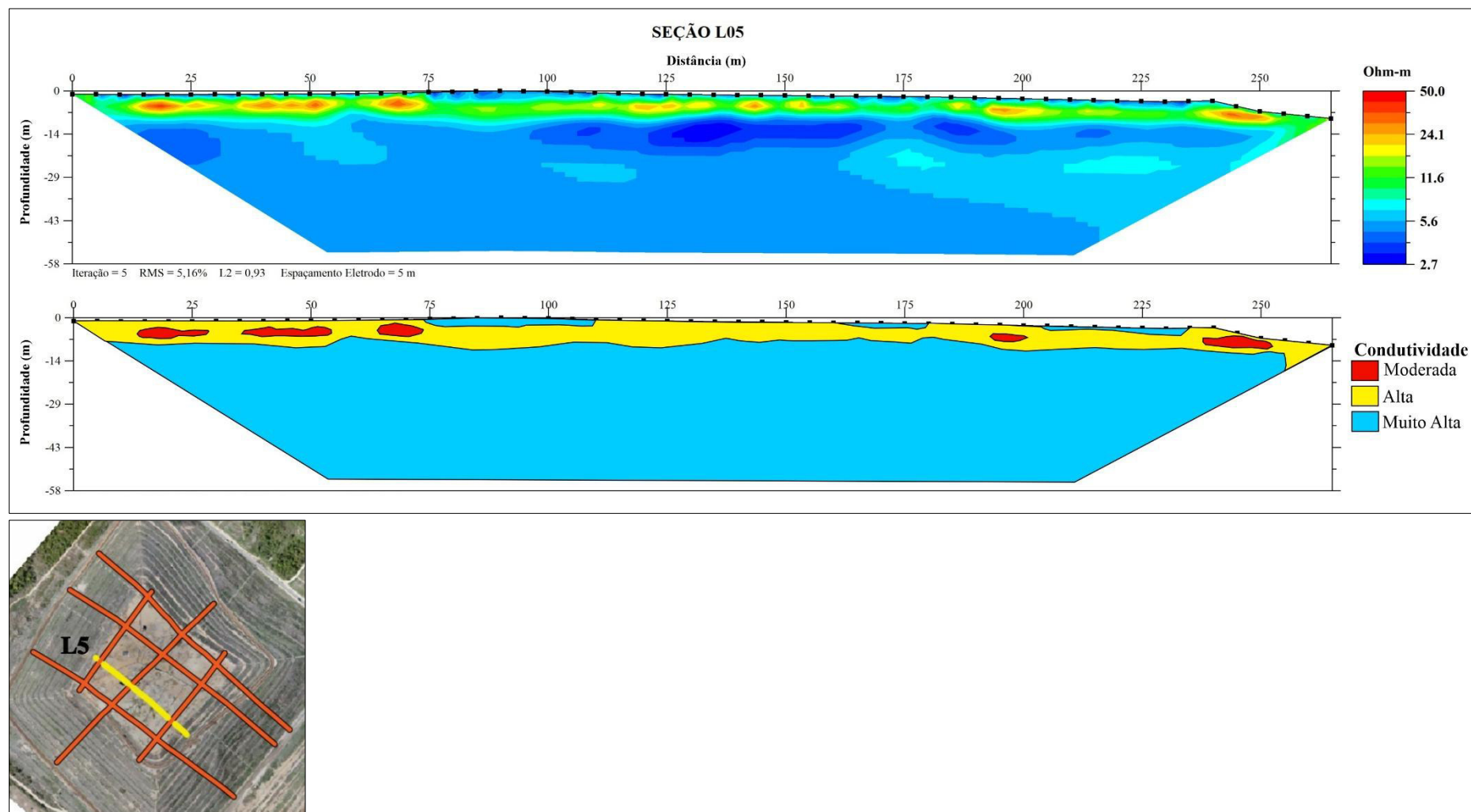
Após a inversão dos dados, pode-se observar o caráter condutivo predominante ao longo de estas seções, apresentando valores de resistividade entre 2,7 ohm.m e 127 ohm.m. Os valores de erro médio quadrático (RMS) variaram entre 5,16% e 6,84%, demonstrando alta qualidade do dado adquirido em campo, permitindo menor diferença entre a resposta final e dados brutos adquiridos.

Para a inversão da seção L5 (figura 4.6) foram realizadas 5 iterações, apresentando um RMS de 5,16% e seus valores de resistividade variaram entre 2.7 ohm.m e 39.6 ohm.m.

As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção menos condutiva ocorre ao longo de toda seção na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, com espessura aproximada de 10 (dez) metros. Logo abaixo da zona menos condutiva é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 2.7 ohm.m a 7 ohm.m. Entretanto, é possível observar discretas zonas muito condutivas na superfície rasa do terreno (aproximadamente 2 metros de espessura), como exemplo entre as posições 75 e 110 metros do perfil.

Já as anomalias resistivas estão destacadas nas seguintes posições: 25, 50, 60, 200 e 250 metros. Estas anomalias (em vermelho) apresentam valores próximos a 40 ohm.m, caracterizados por corpos horizontalizados com aproximadamente 2 (dois) metros de espessura (figura 19).

Figura 19: Seção de resistividade invertida L5 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



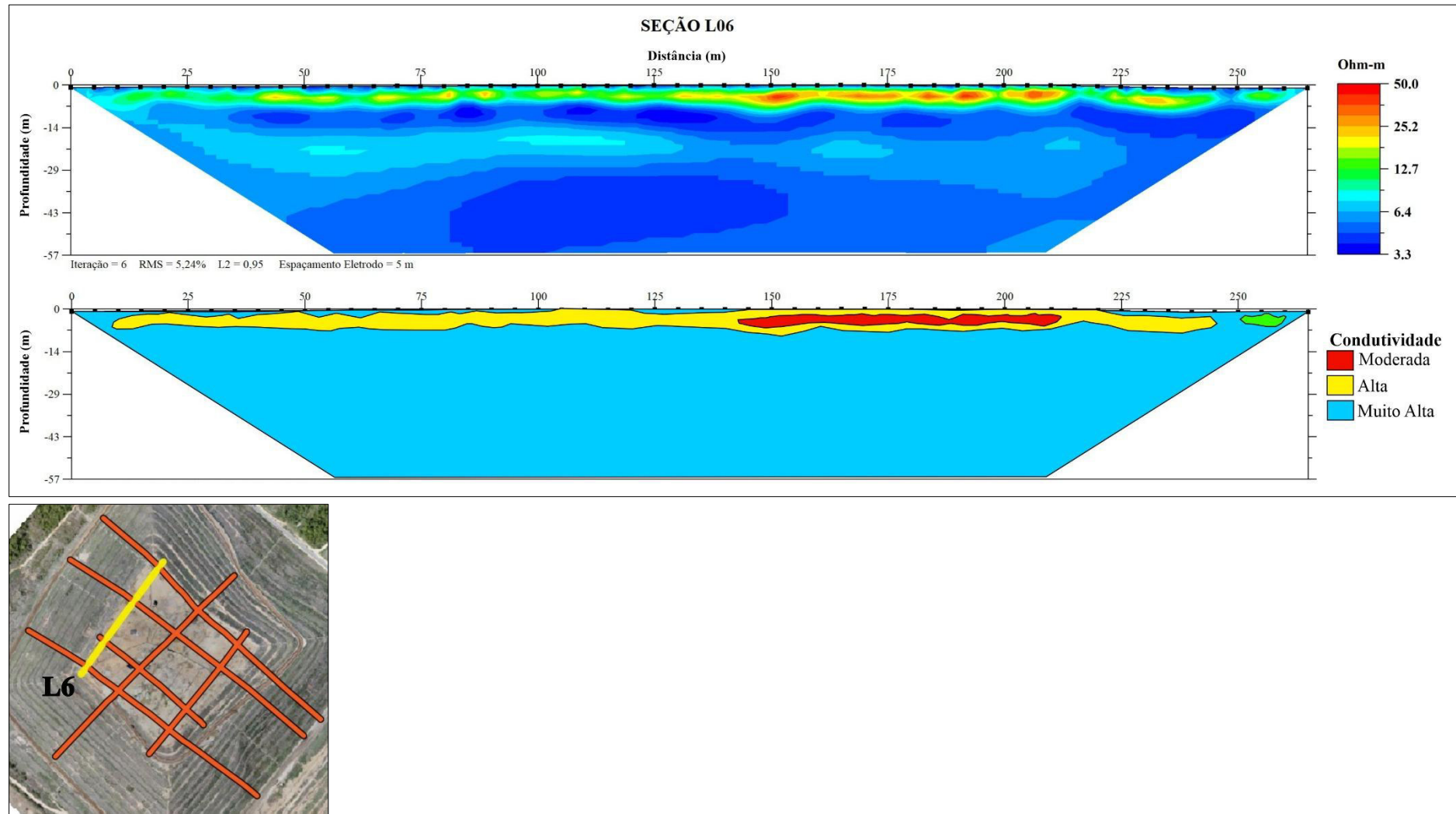
Fonte: elaborado pelo autor.

Para a inversão da seção L6 (figura 20) foram realizadas 6 iterações, apresentando um RMS de 5,24%, os valores de resistividade variaram entre 3,3 ohm.m e 41.7 ohm.m.

As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção ocorre ao longo de toda seção na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, com espessura aproximada de 10 (nove) metros, seus valores de resistividade são maiores que 13 ohm.m. Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente ainda mais condutivo (azul) com resistividades variando entre 3.3 ohm.m e 8.0 ohm.m. Entretanto, é possível observar discretas zonas muito condutivas na superfície rasa do terreno (aproximadamente 1 metro de espessura), como exemplo na posição 60 metros do perfil.

Há uma zona anômala resistiva destacada entre 145 e 210 metros, esta anomalia (em vermelho) apresenta valores próximos a 40 ohm.m e é caracterizada por um corpo alongado e horizontalizado com espessura variando entre 1 e 3 metros.

Figura 20: Seção de resistividade invertida L6 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

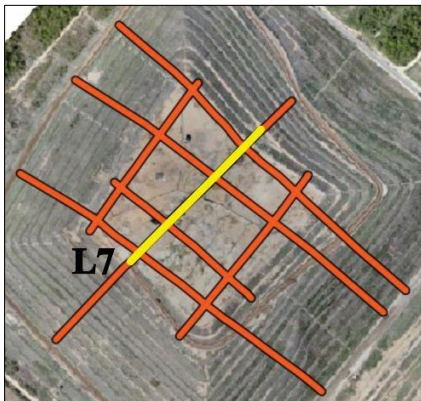
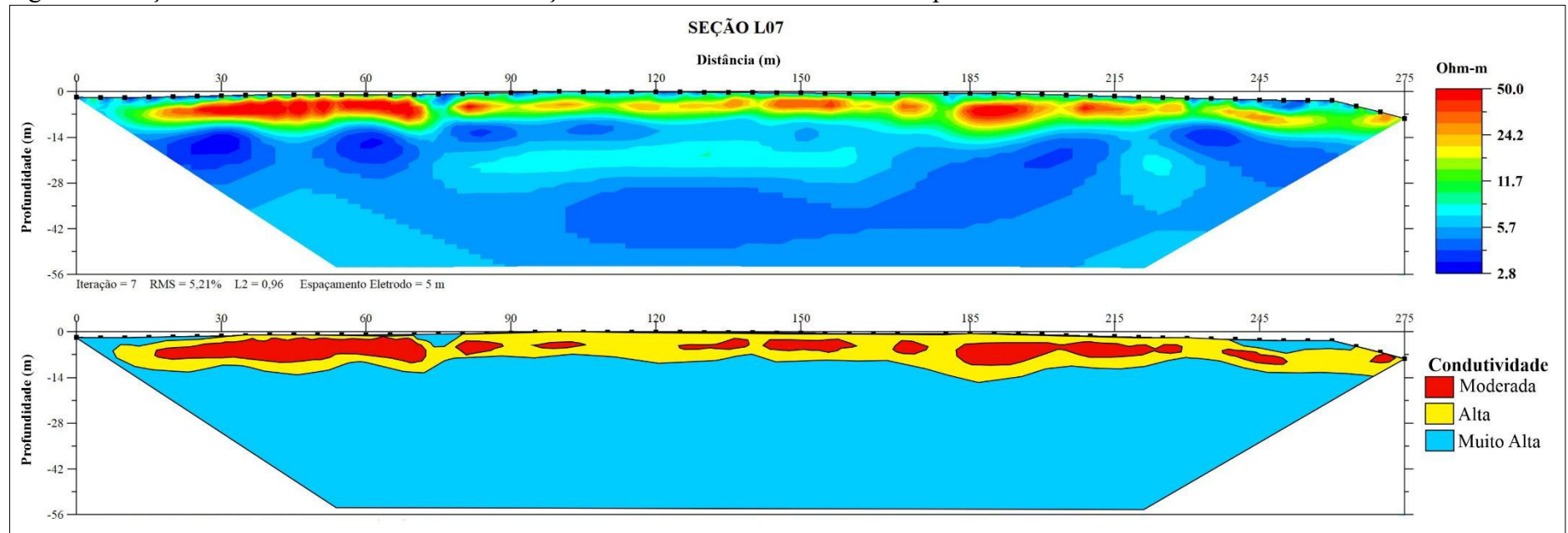
Para a inversão da seção L7 (figura 21) foram realizadas 7 iterações, apresentando um RMS de 5,21%, os valores de resistividade variaram entre 2,8 ohm.m e 127 ohm.m.

As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção ocorre ao longo de toda seção na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, com espessura aproximada de 10 (dez) metros, seus valores de resistividade são maiores que 12 ohm.m. Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 2.8 ohm.m e 5 ohm.m. Entretanto, é possível observar algumas regiões muito condutivas na superfície rasa do terreno (aproximadamente 2 metros de espessura), como visto na distância 245 metros do perfil.

A seção L7 apresentou a maior quantidade de anomalias resistivas (em vermelho) entre todas as seções. A principal anomalia possui aproximadamente 7 (sete) metros de espessura e 55 metros de comprimento (entre 17 e 72 metros no perfil). As anomalias são caracterizadas por corpos alongados e horizontalizados próximos a superfície, que possuem valores variando entre 40 ohm.m e 127 ohm.m.



Figura 21: Seção de resistividade invertida L7 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a inversão da seção L8 (figura 22) foram realizadas 8 iterações, apresentando um RMS de 6,84%, os valores de resistividade variaram entre 2,7 ohm.m e 85 ohm.m.

As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção ocorre ao longo de toda seção na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, com espessura aproximada de 8 (oito) metros, seus valores de resistividade são maiores que 12 ohm.m.

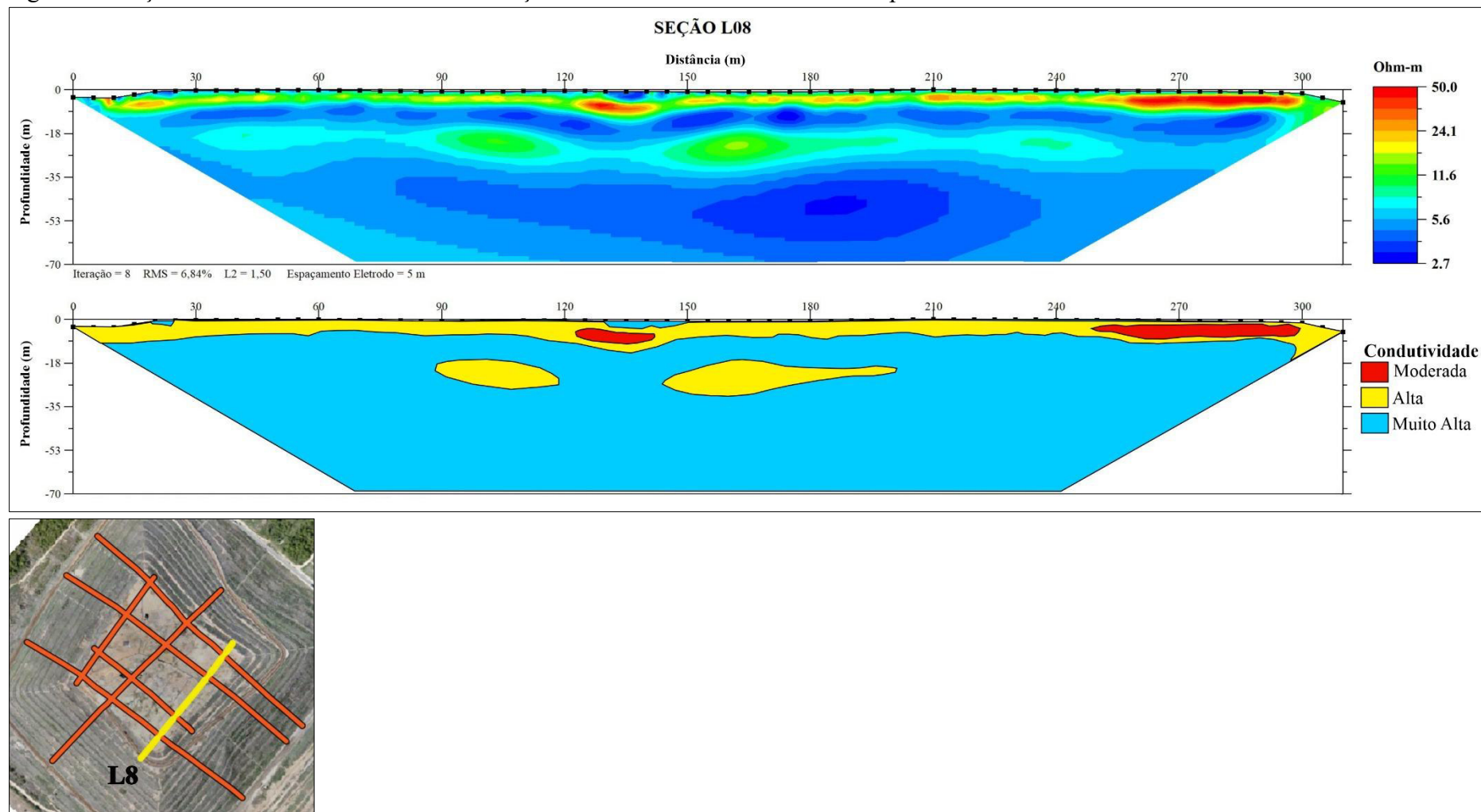
Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 2.7 ohm.m e 7 ohm.m. Entretanto, é possível observar uma pequena área muito condutiva na superfície rasa do terreno (aproximadamente 2 metros de espessura) entre as distâncias 130 a 150 metros da seção.

Na profundidade de 16 metros é possível observar dois corpos com resistividade intermediária variando entre 8.5 ohm.m e 15 ohm.m (amarelo). Os corpos apresentam espessura aproximada de 12 metros e até 55 metros de comprimento.

Já as anomalias resistivas estão destacadas nas posições 130 e 270 metros. Estas anomalias (em vermelho) apresentam valores variando entre 40 ohm.m e 85 ohm.m e são caracterizadas por corpos horizontalizados com aproximadamente 2 (dois) metros de espessura, podendo alcançar até 50 metros de comprimento.

.

Figura 22: Seção de resistividade invertida L8 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

As seções L1 a L4 foram realizadas com espaçamento de 10 metros entre os eletrodos, alcançando entre 500 e 590 metros de comprimento linear, limitadas pelo espaço físico disponível na base do aterro sanitário. A profundidade de investigação geofísica foi, em média, 110 (cento e dez) metros.

Após a inversão dos dados, pode-se observar o caráter condutivo predominante ao longo destas seções, apresentando valores de resistividade entre 1,2 ohm.m e 98 ohm.m. Os valores de erro médio quadrático (RMS) variaram entre 7,27% e 9,29%, demonstrando boa qualidade no dado adquirido em campo, permitindo menor diferença entre a resposta final e dados brutos.

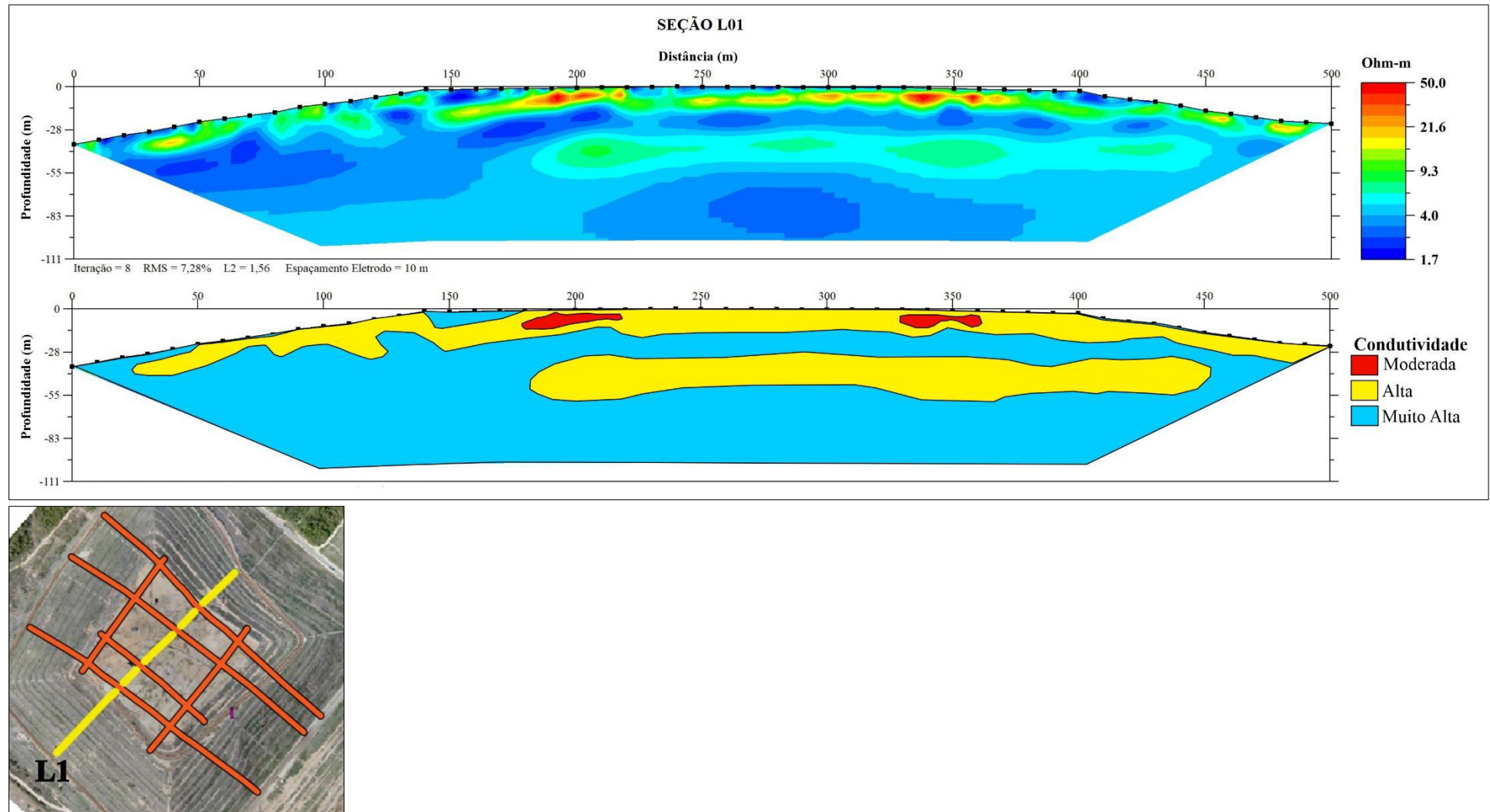
Para a inversão da seção L1 (figura 4.10) foram realizadas 8 iterações, apresentando um RMS de 7,28%, os valores de resistividade variaram entre 1,7 ohm.m e 57 ohm.m.

As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção ocorre ao longo de toda seção na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, variando entre 10 e 15 metros de espessura, seus valores de resistividade são maiores que 12 ohm.m. Entretanto, é possível observar áreas muito condutivas na superfície rasa do terreno (aproximadamente 10 metros de espessura) localizada nas distâncias 150 e 400 metros da seção.

Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 1.7 ohm.m e 5 ohm.m. Contudo destaca-se uma faixa intermediária que apresenta resistividades entre 5 ohm.m e 8 ohm.m e está localizada a 30 metros de profundidade. Esse corpo possui 20 metros de espessura e 268 metros de comprimento.

Já as anomalias resistivas estão destacadas nas posições 200 e 350 metros. Estas anomalias (em vermelho) apresentam valores variando entre 40 ohm.m e 57 ohm.m e são caracterizadas por corpos horizontalizados com aproximadamente 7 (sete) metros de espessura, podendo alcançar até 40 metros de comprimento (figura 23).

Figura 23: Seção de resistividade invertida L1 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

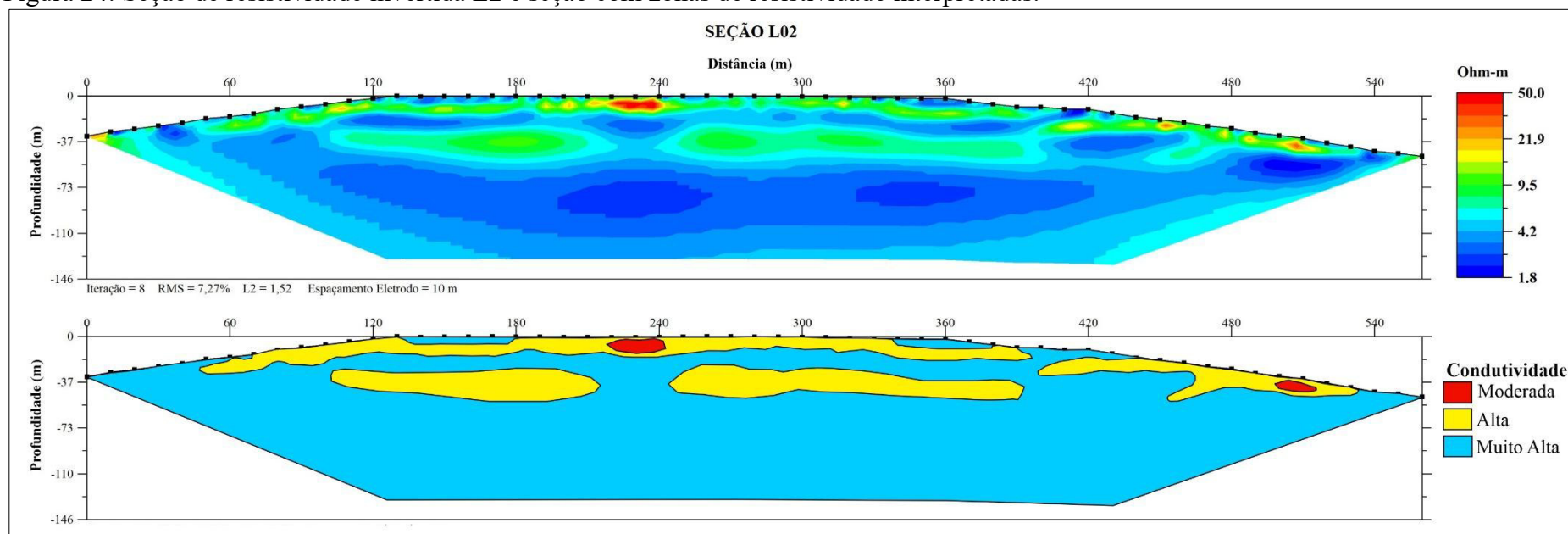
Para a inversão da seção L2 (figura 24) foram realizadas 8 iterações, apresentando um RMS de 7,27%, os valores de resistividade variaram entre 1,8 ohm.m e 98 ohm.m.

As maiores medidas de resistividades se encontram nas porções mais superficiais da seção, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas, apresentando valores superiores a 10 ohm.m. Esta zona possui formato irregular, porém mantendo uma tendência sub-horizontal. ora mais espessa ora mais estreita (até 10 metros de espessura). Entretanto, é possível observar áreas muito condutivas (em azul) na superfície rasa do terreno, como exemplo entre as distâncias 340 a 380 metros.

Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 1.8 ohm.m e 5 ohm.m. Contudo, destacam-se duas zonas intermediárias que apresentam resistividades entre 7 ohm.m e 10 ohm.m e estão localizadas a cerca de 26 metros de profundidade do topo da seção (em amarelo). Os corpos possuem até 20 metros de espessura e 140 metros de comprimento, apresentando formato de bolsões alongados e horizontalizados.

A seção possui duas zonas com anomalias resistivas (em vermelho), sendo destacadas nas posições 230 e 510 metros. Estas anomalias (em vermelho) apresentam valores variando entre 40 ohm.m e 98 ohm.m e são caracterizadas por corpos horizontalizados com até 6 (seis) metros de espessura, podendo alcançar até 20 metros de comprimento.

Figura 24: Seção de resistividade invertida L2 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

Para a inversão da seção L3 (figura 25) foram realizadas 8 iterações, apresentando um RMS de 7,29%, os valores de resistividade variaram entre 1,6 ohm.m e 37,2 ohm.m.

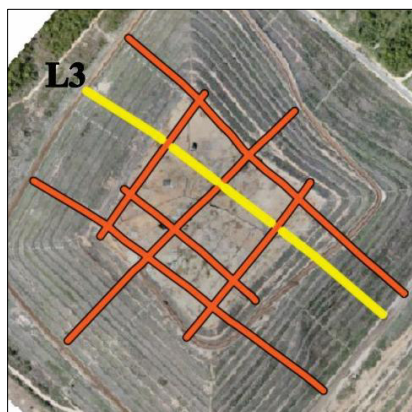
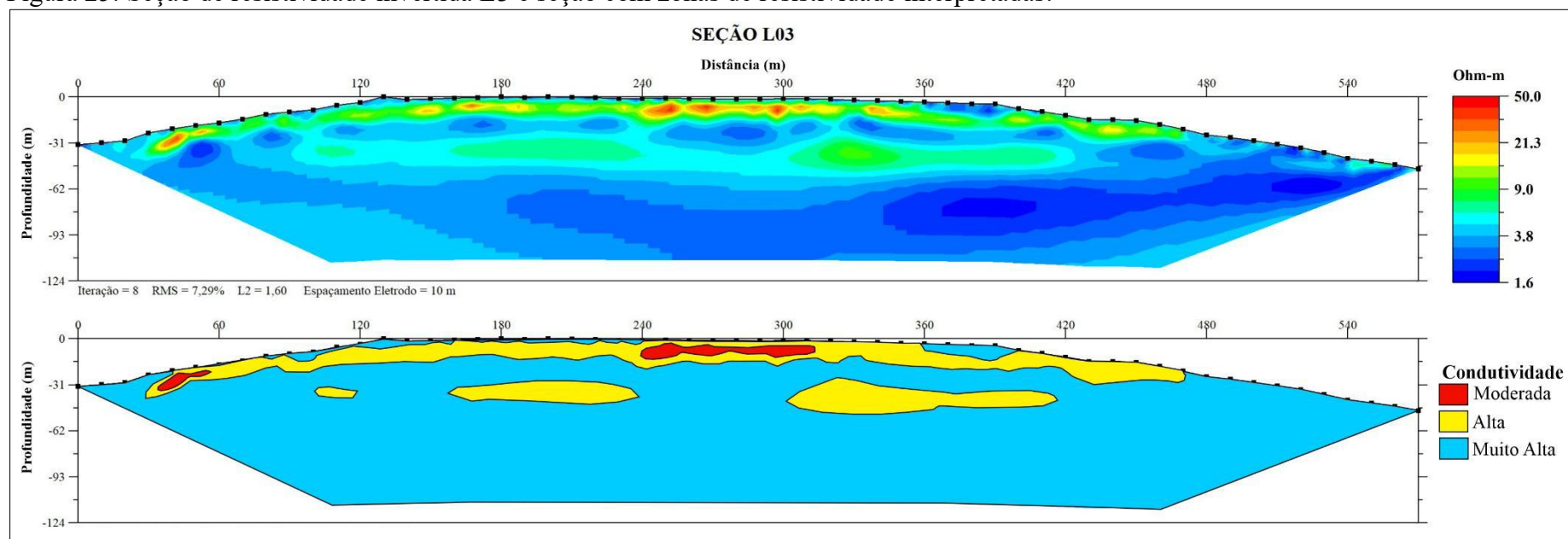
As porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade (entre 10 e 37,2 ohm.m), em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Apresentando formato alongado, sub-horizontal, com espessura atingindo até 13 metros e ocorrendo entre as distâncias 30 e 470 metros. Entretanto, é possível observar áreas muito condutivas (em azul) na superfície rasa do terreno, como exemplo na lateral da seção, entre as distâncias 480 a 570 metros.

Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 1.6 ohm.m e 5 ohm.m. Contudo, destacam-se duas zonas intermediárias que apresentam resistividades entre 6 ohm.m e 10 ohm.m e estão localizadas a cerca de 26 metros de profundidade do topo da seção (em amarelo). Os corpos possuem até 20 metros de espessura e 110 metros de comprimento (entre as distâncias 305 e 410 metros), apresentando formato de bolsões alongados e horizontalizados.

A seção possui duas zonas com anomalias resistivas (em vermelho), sendo a principal delas com 70 metros de comprimento (entre as posições 240 e 310 metros) e até 6 metros de espessura. Estas anomalias apresentam valores próximos a 37,2 ohm.m.



Figura 25: Seção de resistividade invertida L3 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor

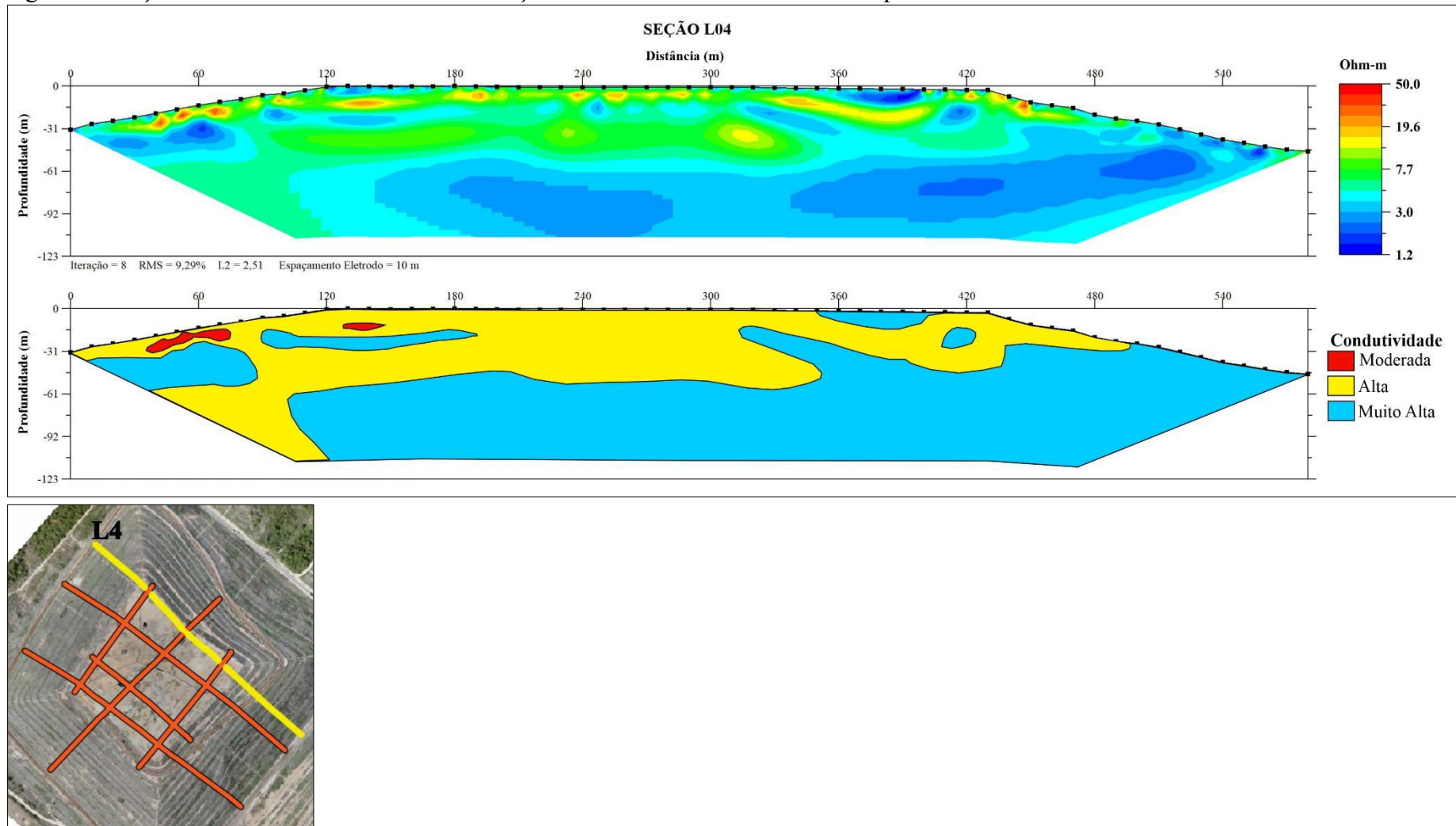
Para a inversão da seção L4 (figura 26) foram realizadas 8 iterações, apresentando um RMS de 9,29%, os valores de resistividade variaram entre 1,2 ohm.m e 37,1 ohm.m.

Esta seção apresentou um comportamento distinto das demais, apresentando maiores resistividades na parte superior e alcançando maiores profundidades na borda inferior esquerda da seção. Essa zona, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas, possui valores de resistividade variando entre 7 ohm.m e 37,1 ohm.m. De forma geral a geometria do corpo é irregular, possuindo anomalias condutivas (em azul) no seu interior, com resistividades entre 1,7 ohm.m e 4 ohm.m.

Logo abaixo desta zona é predominante a existência de um ambiente muito condutivo (azul) com resistividades variando entre 1.2 ohm.m e 4 ohm.m.

A seção possui duas zonas com anomalias resistivas (em vermelho), sendo a principal delas com 30 metros de comprimento (entre as posições 40 e 70 metros) e até 5 metros de espessura. Estas anomalias apresentam entre 29 e 37,2 ohm.m.

Figura 26: Seção de resistividade invertida L4 e seção com zonas de resistividade interpretadas.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### **4.3.1 Discussão dos resultados**

Através dos resultados das seções de tomografia elétrica 2D, observou-se que o arranjo dipolo-dipolo utilizado na aquisição geofísica permitiu, em termos de resolução, um excelente resultado para prospecção de estruturas horizontalizadas. Dessa forma, possibilitando identificar possíveis padrões existentes no aterro sanitário.

As seções de resistividade L5, L6, L7 e L8 apresentaram melhor resolução lateral e vertical principalmente na porção mais rasa e subsuperficial do aterro sanitário. Essa melhor resolução permitiu um maior detalhamento de possíveis estruturas relacionadas a presença e acúmulo de biogás. O maior grau de detalhamento ocorre devido menor espaçamento entre os eletrodos existentes nesses perfis (5 metros), permitindo maior quantidade de leituras de dados na região mais rasa do aterro sanitário. Em contrapartida, o menor espaçamento entre os eletrodos acarretou um menor alcance de profundidade do estudo geofísico (até 60 metros).

Ao longo destes perfis geofísicos se observou que as porções mais superficiais apresentam predominância de maiores valores de resistividade, em tonalidades verde-amarelo/avermelhadas. Essa porção menos condutiva ocorre ao longo das seções na forma de uma faixa sub-horizontal bem definida, com espessura aproximada de 10 (dez) metros.

Além disso, foram observadas outras zonas de alto contraste comum a todas as seções, com a ocorrência de regiões de alta condutividade, localizadas logo abaixo da região menos condutiva. Essa região com alta condutividade está representada nas tonalidades azuis. Uma característica identificada nessas regiões de alta condutividade no perfil geofísico é que geralmente elas se apresentam em forma de “bolsões alongados” sub-horizontalizados.

As seções de tomografia elétrica L5, L6, L7 e L8 apresentaram, em geral a partir de 10 metros de profundidade, uma predominância de um comportamento homogêneo muito condutivo caracterizado por valores de resistividade entre 1,2 ohm.m e 5 ohm.m estando associados à existência de contaminação por chorume e lixiviados no interior do aterro sanitário, como exemplo no perfil L5 (ver figura 19).

As seções de tomografia elétrica L1, L2, L3 e L4 apresentaram maior alcance em relação a profundidade de investigação, permitindo melhor caracterização de feições e estruturas na região mais profunda do aterro sanitário. Estes perfis foram essenciais para caracterização de zonas com presença/acúmulo de chorume, apresentando profundidade teórica de investigação de aproximadamente 110 (cento e dez) metros.

Para estas seções as zonas menos condutivas (cores quentes) bem destacadas nos perfis de 5m não se apresentaram tão evidentes nas porções rasas, como exemplo na seção L2 (ver figura 24). Isto ocorre por conta que o maior espaçamento entre os eletrodos causa uma perda de resolução em profundidades mais rasas.

Em relação às zonas mais condutivas (entre 1,2 e 5 ohm.m), pode-se destacar sua ocorrência em todas as seções e se estendo para as maiores profundidades (até 110 metros), evidenciando o caráter predominante condutivo no aterro causado pela produção de chorume e percolação de lixiviado no interior do aterro sanitário.

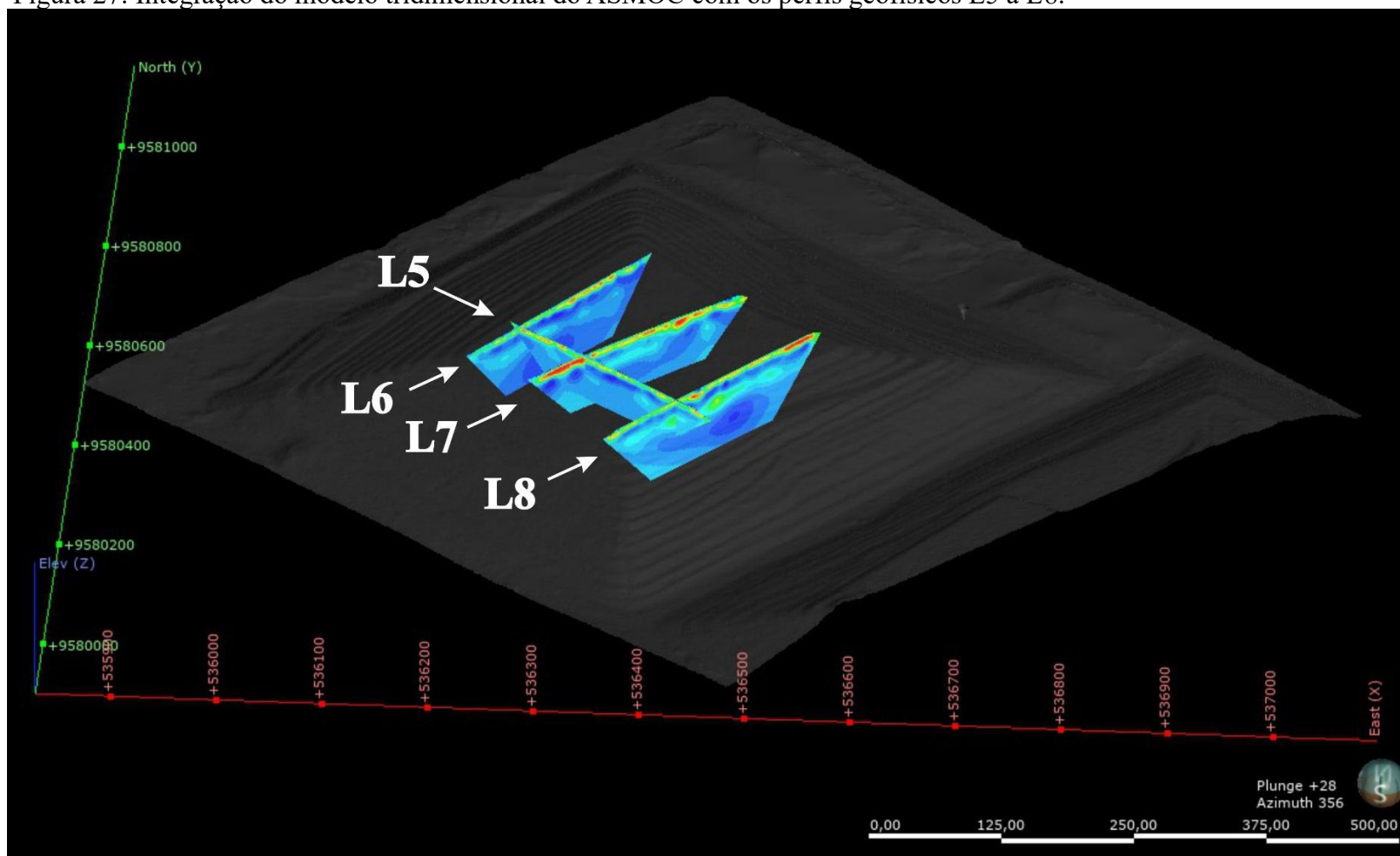
As seções L1 a L4 permitiram delimitar uma zona um pouco menos condutiva, com valores próximos a 10 ohm.m. Situada a 26 metros de profundidade, tal zona apresenta espessura aproximada de 20 metros e até 140 metros de comprimento nas seções de tomografia elétrica, podendo estar associado a uma zona de formação de biogás mais profunda.

#### 4.4 Integração das seções

Após a etapa de processamento, foi realizado a integração das seções invertidas de tomografia elétrica 2D com o modelo 3D do aterro sanitário, gerado a partir do MDT no software de modelagem *leapfrog*.

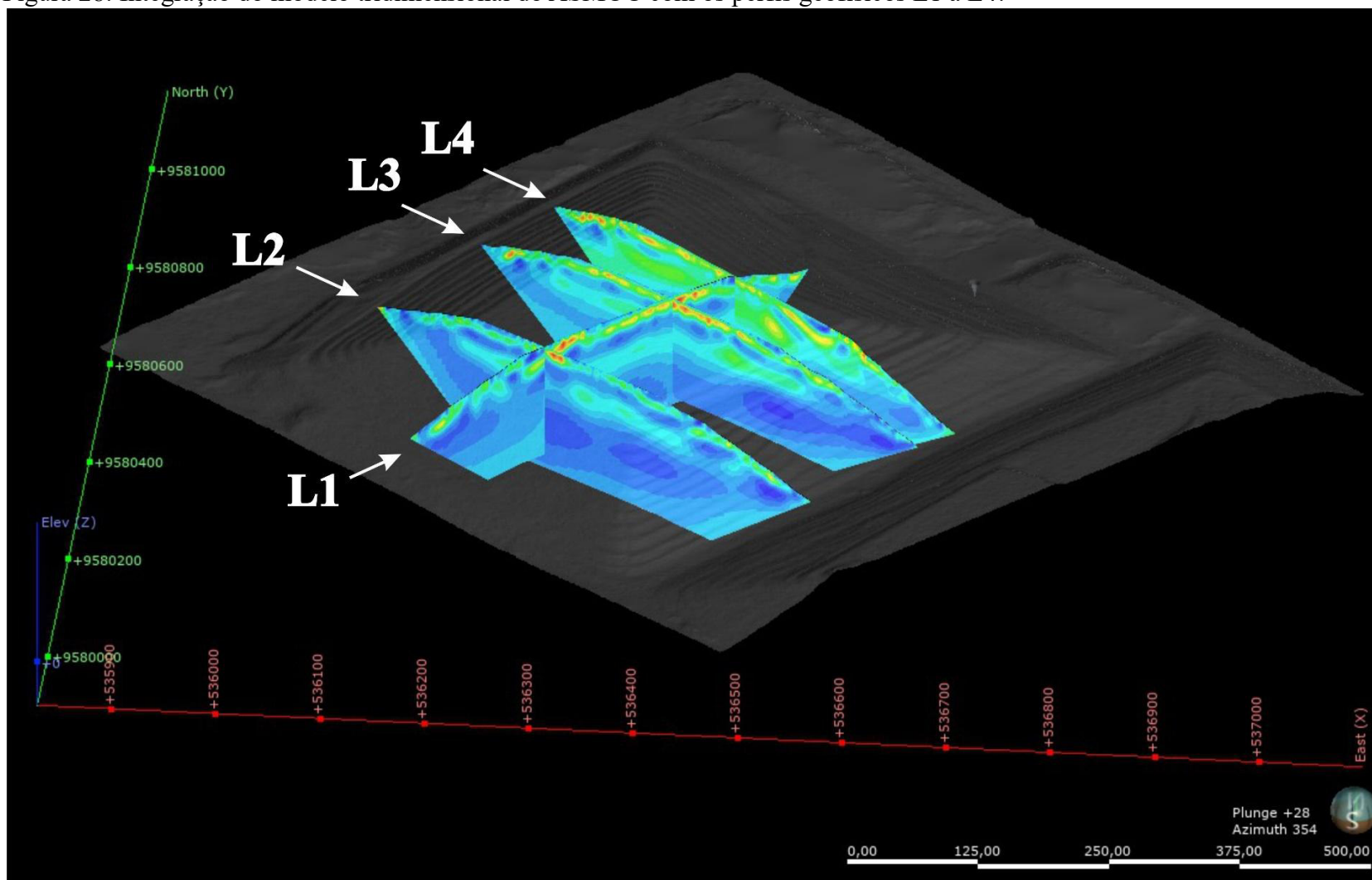
Dessa forma, foi possível alcançar um melhor entendimento do comportamento geoelétrico no interior do aterro sanitário, integrando tanto os perfis com 5 metros de espaçamento (figura 27), quanto os perfis com 10 metros de espaçamento (figura 28). Para facilitar a visualização, também foi realizado a integração utilizando apenas as seções invertidas (figuras 29 e 30) no *leapfrog*.

Figura 27: Integração do modelo tridimensional do ASMOC com os perfis geofísicos L5 a L8.



Fonte: software leapfrog.

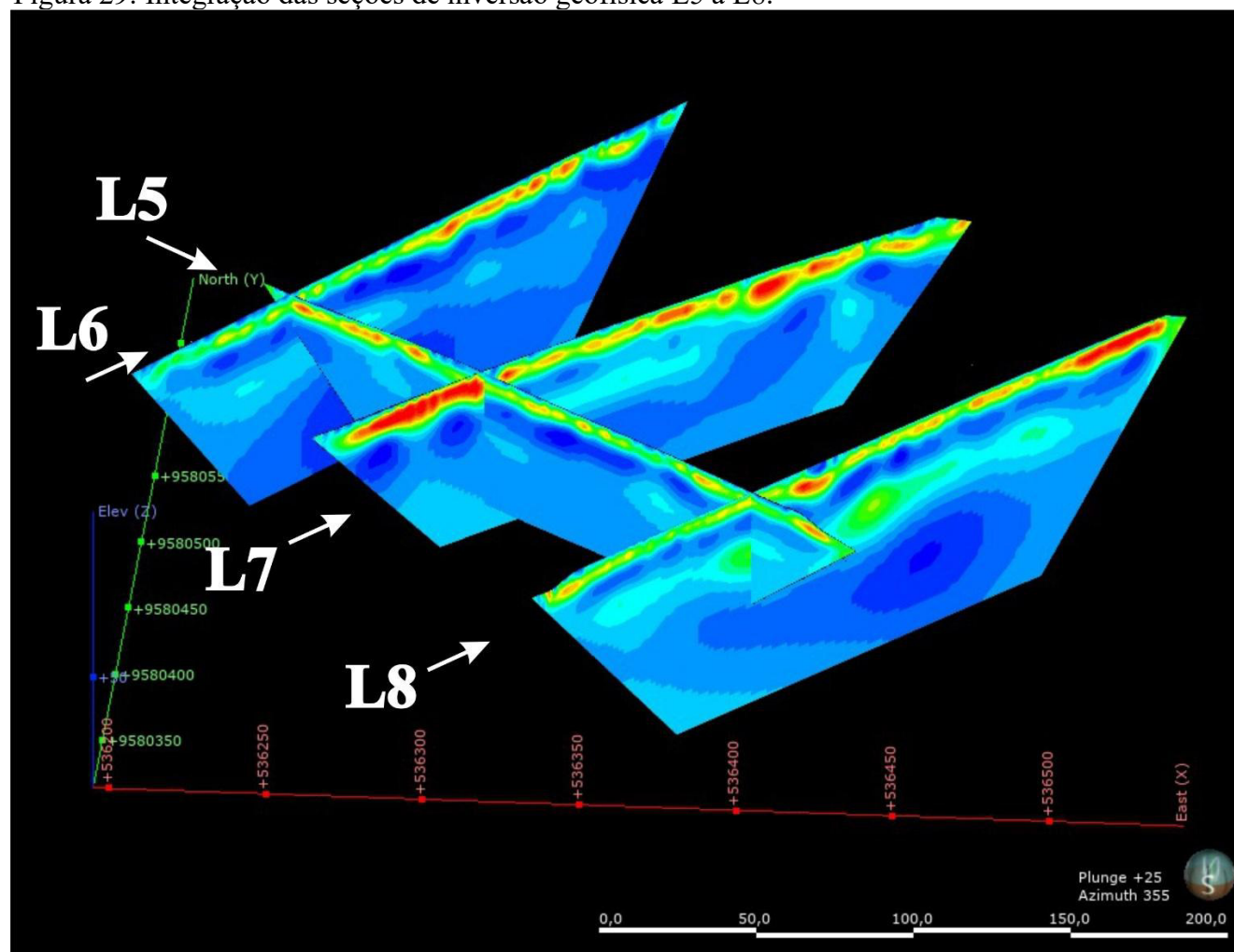
Figura 28: Integração do modelo tridimensional do ASMOC com os perfis geofísicos L1 a L4.



Fonte: Software leapfrog.

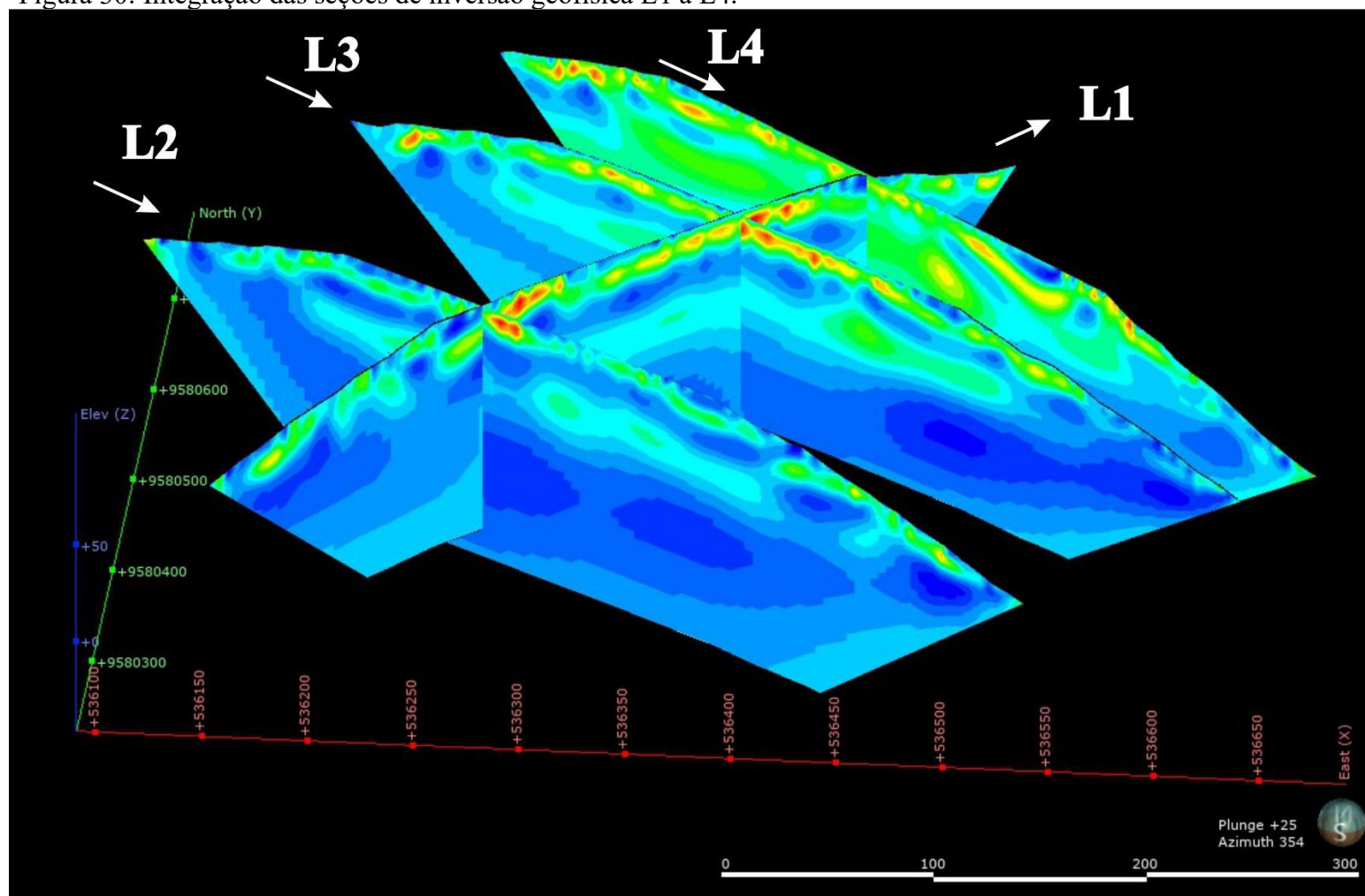


Figura 29: Integração das seções de inversão geofísica L5 a L8.



Fonte: Software leapfrog.

Figura 30: Integração das seções de inversão geofísica L1 a L4.



Fonte: Software leapfrog

A partir das integrações das seções, observou-se zonas mais resistivas (tons amarelados/avermelhados), esta camada geoeétrica apresenta resistividades entre 30 e 127 *ohm.m* e estão concentradas nas profundidades rasas do aterro sanitário (figura 29), alcançando até 15 metros de profundidade a partir do topo.

Em sequência, destaca-se a existência de zonas muito condutivas (azul) por todos os perfis e que se localizam logo abaixo das zonas mais resistivas. Estes corpos condutivos apresentam resistividades muito baixas, na ordem de 2 a 5 *ohm.m*, podendo serem interpretados como a presença de chorume, justificando o caráter muito condutivo da camada geoeétrica. Essas faixas condutivas se encontram logo abaixo da zona resistiva e alcançam até as maiores profundidades na seção de tomografia elétrica.

A figura 30 permite constatar um maior predomínio de zonas intermediárias resistivas (tons amarelados) abrangendo boa parte do aterro. Estas zonas estão presentes em duas profundidades distintas, sendo uma mais rasa (até 15 metros de profundidade) e outra mais profunda (entre 26 e 46 metros). As duas zonas resistivas estão separadas pela presença de uma zona muito condutiva (azul claro). Destaca-se que a camada geoeétrica profunda está concentrada somente na região central do aterro e aparece bem distribuída. A conexão dessa zona intermediária profunda, observada entre as seções L1 e L3, evidencia sua grande distribuição no interior do aterro sanitário.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho foi composto pela aquisição de dados geofísicos através do método geoeletrico (eletroresistividade). Foram adquiridas 8 (oito) seções com extensões variando entre 270 e 590 metros, perfazendo um total linear da ordem de 3.385 (três mil trezentos e oitenta e cinco) metros de aquisição. Em complemento, foi realizado um levantamento aerofotogramétrico permitindo a elaboração de produtos como ortomosaico e MDT para a área de estudo. Além disso foi realizado uma interpolação utilizando valores de vazões médias mensais dos poços de captação de biogás, cedidos pela GNR Engenharia Ltda.

Após as etapas de análise de trabalhos pretéritos, processamento e interpretação dos dados é possível destacar as seguintes considerações:

*i)* O padrão geral de resistividade (background) para a área, constatado nas 8 (oito) seções realizadas no aterro sanitário foi a presença de um ambiente fortemente condutivo (valores de resistividade entre 1,2 e 127 ohm.m). Este fato é justificado pela presença heterogênea de resíduos e matéria orgânica, provavelmente influenciado pela ocorrência de chorume, além da presença de chuvas durante o período de aquisição geofísica aumentando a condutividade no aterro;

*ii)* Observou-se uma zona muito rasa com condutividade menor do que o padrão geral observado, esta zona se estende ao longo dos 8 (oito) perfis. Apresentando-se de forma alongada e sub-horizontalizada, de espessura variando entre 10 e 15 metros. As seções com 5 metros de espaçamento entre os eletrodos melhor caracterizaram tal zona.

*iii)* Os perfis L1 a L4 e L8 permitiram destacar um corpo um pouco mais resistivo (próximos a 10 ohm.m) localizado a 26 metros de profundidade. Essa zona possui cerca de 20 metros de espessura e alcança até 140 metros de comprimento, apresentando-se de forma alongada e horizontalizada e concentrada na região central do aterro sanitário.

*iv)* Os perfis L5 a L8, apresentaram maior detalhe. Permitindo melhor visualização principalmente na porção mais rasa da área. Tal região é marcada pela ocorrência de uma faixa alongada menos condutiva (30 a 127 ohm.m), bem destacada nas descrições anteriores deste grupo de perfis. Esta zona pode estar relacionada a presença e acúmulo de biogás nesta porção.

v) Observa-se zonas muito condutivas em todas as seções, com valores de resistividade entre 1,2 ohm.m e 5 ohm.m (em azul), localizadas abaixo das zonas resistivas e provavelmente podem estar relacionadas ao acúmulo/presença de chorume, justificando esse caráter altamente condutivo;

vi) A geofísica através da técnica da tomografia elétrica se mostrou eficaz no mapeamento e diferenciação de zonas associadas a presença de contaminação por chorume, e biogás. Com as diferentes profundidades alcançadas e resoluções obtidas nas seções geofísicas, conseguiu-se atingir o objetivo proposto inicial do trabalho em caracterizar principalmente a estrutura do maciço;

vii) O levantamento aerofotogramétrico permitiu uma precisão topográfica centimétrica para o projeto, possibilitando a criação do Modelo Digital de Terreno e ortomosaico da área. A partir do qual foi criado um modelo do aterro sanitário utilizado para a integração dos perfis geofísicos e auxiliando na interpretação dos dados.

viii) A interpolação gerada a partir dos valores de vazões médias mensais dos poços de captação de biogás evidenciaram que a maior produção do aterro e os principais poços estão localizados na região central do ASMOC, corroborando com a resposta geoelétrica no aterro sanitário.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2003.
- ABRELPE. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, 2022.
- ALVES, João Wagner Silva. **Diagnóstico técnico institucional da recuperação e uso energético do biogás gerado pela digestão anaeróbia de resíduos**. 2000. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, ABNT. **NBR 8.419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 7 p., 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8419: apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRAS DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10004: Resíduos Sólidos: classificação**. Rio de Janeiro, 2004.
- APOIO A SERVIÇOS TÉCNICOS, ENSINO E FOMENTO A PESQUISAS, ASTEF. **Relatório de Impacto Ambiental do Aterro Sanitário Metropolitano Oeste de Caucaia - Ceará**. v.13, p.81- Fortaleza: ASTEF/UFC, 1989.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. Curso Básico de Geofísica Aplicada Módulo 1: Métodos Geométricos Aplicados a Hidrogeologia. Rio Claro: **Instituto de Geociências e Ciências Exatas/UNESP**, v. 1, p. 33, 1999.
- BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. **Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática**. 2006. ii, 121 f. Tese (livre-docência) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 2006.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Programa Nacional De Capacitação De Gestores Ambientais - PNC: módulo específico licenciamento ambiental de estações de tratamento de esgoto e aterros sanitários**. Brasília: MMA, 2009.
- CHEREMISINOFF, Nicholas. Handbook of solid waste management and waste minimization technologies. **Butterworth Heinemann – Elsevier Science**. Burlington – MA, 2003.
- CHRISTENSEN, Thomas; KJELDSEN, Peter; BJERG, Poul; JENSEN, Dorte; CHRISTENSEN, Jette; BAUN, Anders; HERON, Gorm. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Applied geochemistry**, v. 16, n.7-8, p. 659-718, 2001.
- CRUVINEL, Vanessa Resende Nogueira et al. Health conditions and occupational risks in a novel group: waste pickers in the largest open garbage dump in Latin America. **BMC public health**, v. 19, p. 1-15, 2019.

EMCON Associates, CalRecovery Systems, Inc; and Gas Recovery Systems, Inc., 1981. **Feasibility Study**: utilization of landfill gas for a vehicle fuel system, rossman's landfill, Clackamas County, Oregon. Washington, D.C.: Department of Energy, 1981.

ENSINAS, Adriano Viana. **Estudo da geração de biogás no aterro sanitário delta em Campinas - SP**. 2003. 129 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas-SP. 2003.

GADOTTI, Romeu Francisco. **Avaliação da contaminação das águas superficiais e subterrâneas adjacentes ao lixão da cidade de São Carlos**. 1997. 150 f. Dissertação (mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1997.

GEORGAKI, Irene; SOUPIOS, Pantelis; SAKKAS, Nikos. Evaluating the use of electrical resistivity imaging technique for improving CH<sub>4</sub> and CO<sub>2</sub> emission rate estimations in landfills. **Science of the total environment**, v. 389, n. 2-3, p. 522-531, 2008.

IANNICELLI, André Luiz. **Reaproveitamento energético do biogás de uma indústria cervejeira**. 2008. 105 f. Dissertação (mestrado) - Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade de Taubaté, 2008.

IRENA, Renewable capacity statistics - **International Renewable Energy Agency (IRENA)**, Abu Dhabi, 2021.

LAUREANO, Andreza Tiezen. **Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá, MT**. 2007. 149 f. Dissertação (mestrado) – Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Programa de Pós-graduação em Física e Meio Ambiente, Universidade Federal de Mato Grosso, 2007.

LIAO, Chuan; ERBAUGH, James; KELLY, Alisson C; AGRAWAL, Arun. Clean energy transitions and human well-being outcomes in Lower and Middle Income Countries: a systematic review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 145, n. 111063, 2021.

LINARD, André de Freitas Gomes. **Análise do aproveitamento energético do biogás do aterro sanitário metropolitano oeste em Caucaia sob a perspectiva do mecanismo de desenvolvimento limpo**. 2010 100f. Dissertação (mestrado). Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

MARRIOTT, Emma. **A história do mundo para quem tem pressa** [recurso eletrônico] / Emma Marriott; tradução de Paulo Afonso. - 1. ed. - Rio de Janeiro: Valentina, recurso digital (Trilogia forever; 1), 2015.

MILANEZ, Artur Yabe; MAIA, Guilherme Baptista da Silva; GUIMARÃES, Diego Duque. Biogás: evolução recente e potencial de uma nova fronteira de energia renovável para o Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 27, n. 53, p. 177-216, mar., 2021.

MITAL, K. **Biogas systems: principles and applications, new age international (P)**. 1996.

MONTEIRO, José Henrique Penido. **Manual de Gerenciamento Integrado de resíduos sólidos**. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

MORAIS, Josmaria Lopes de; SIRTORI, Carla; PERALTA-ZAMORA, Patricio. Tratamento de chorume de aterro sanitário por fotocatalise heterogênea integrada a processo biológico convencional. **Química Nova**, v. 29, p. 20-23, 2006.

MOREIRA, Cesar Augusto; MUNHOZ, Thais; CAVALLARI, Fernanda; HELENE, Livia Portes Inocenti. Electrical resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill. **Geofísica Internacional**, v. 54, n. 4, p. 353-362, 2015.

MOREIRA, Cesar Augusto; BRAGA, Antônio Celso de Oliveira. Aplicação de métodos geofísicos no monitoramento de área contaminada sob atenuação natural. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, p. 257-264, 2009.

NETO, José Capelo; CASTRO, Marco Aurélio Holanda; Simulação e avaliação do desempenho hidrológico da drenagem horizontal de percolado em aterro sanitário. In: **Engenharia Sanitária e Ambiental**. Vol. 10, n. 3, p 229-235. Rio de Janeiro, RJ. 2005.

OLIVEIRA, Cláudio André Almeida de. **Análise do fluxo de gases na camada de cobertura do Aterro Sanitário Municipal Oeste de Caucaia (ASMOC)**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil. Saneamento Ambiental) - Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2011.

OLIVEIRA, Mônica Texeira de; MOREIRA, Cesar Augusto; MENEZES, Aline Muriel da Cunha. Aplicação do método de polarização induzida em área de disposição de resíduos sólidos no município de Caçapava do Sul-RS. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 29, p. 377-384, 2011.

ORELLANA, Ernesto. **Prospection Geoeletrica em Corriente Continua**. Madrid: Ed. Paraninfo, 1972.

OTTINGER, R. L; WOOLEY, D. R; Robinson, N A; HODAS, D. R; BABB, S. E, BUCHANAN, S. C; CHERNICK, P. L, CAVERHILL, E; KRUPNICK, A; HARRINGTON, W; RADIN, S; FRITSCH, U. 1991. Environmental costs of electricity/ prepared by Pace University center for environmental legal studies. Ed. **Oceana Publications**, 1991.

PALERMO, Giuseppe Cernicchiaro, GOMES, Ana Paula Pereira. **Tratamento e Gestão de Resíduos**. Rio de Janeiro: UVA, 2017.

REDE DE CAPACITAÇÃO E EXTENSÃO TECNOLÓGICA EM SANEAMENTO AMBIENTAL, ReCESA. **Projeto, operação e monitoramento de aterros sanitários**. Guia do profissional em treinamento. Belo Horizonte. 2008.



RODRIGUES, Cristiane Lorena; TAIOLI, Fabio. Retenção de metais pesados no solo de cobertura do lixão de Ilhabela – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 22., 2003, Joinville. **Anais...** Joinville: ABES, 4p., 2003.

SANTOS, Gemmelle. **Composição gravimétrica dos resíduos sólidos domiciliares de Fortaleza/CE dispostos no Aterro Sanitário de Caucaia/CE**. Revista Tecnologia (UNIFOR), v. 31, p. 39-50, 2010.

SANTOS, Ivan Felipe Silva dos; BARROS, Regina Mambelli; TIAGO FILHO, Geraldo Lúcio. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potential. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 504-514, 2016.

SCHOELL, Martin. Multiple origins of methane in the Earth. **Chemical Geology**, v.71, n. 1-3, p. 1-10, 1988. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(88\)90101-5](https://doi.org/10.1016/0009-2541(88)90101-5).

SIQUEIRA NETO, Antônio Carlos; ELIS, Vagner Roberto. Characterization of an experimental cell in a municipal solid waste landfill using 2-D electrical profiling technique. **Brazilian Journal of Geophysics**, v. 34, n. 4, p. 559-570, 2016.

SVENSSON, Manin; DAHLIN, Torleif. Detection of gas in landfills using geophysical methods. **Linnaeus Eco-Tech**, p. 533-538, 2007.

TCHOBANOGLIOUS, George; THEISEN, Hilary; VIGIL, Samuel. Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles and Management Issues, McGraw-Hill, **New York**, 1993.

UMETSU, Kazutaka; TAKAHATA, Hidehiko; KAWAMOTO, Tisnemi; **Effect of temperature on mesophilic anaerobic digestion of dairy cow slurry**. Res.Bull. Obihiro Univ. Ser.I v.17, n. 4, p 401–408, 1992.

WARD, Stanley H. Resistivity and induced polarization methods in geotechnical and environmental geophysics. Tulsa: **Society of Exploration Geophysicists**, 1990.