

UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA  
Curso de Pós-graduação em Geofísica

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

CARACTERIZAÇÃO GEOFÍSICA  
MULTIMÉTODOS DE ATERROS  
SANITÁRIOS

PABLO UALE DE CARVALHO SILVA

VIRTUTE SPIRITUS

SALVADOR – BAHIA  
SETEMBRO – 2024





# Caracterização Geofísica Multimétodos de Aterros Sanitários

por

PABLO UALE DE CARVALHO SILVA

Geofísico (Universidade Federal da Bahia – 2019)

Eng. Civil (Universidade Salvador – 2022)

Orientador: Prof. Dr. Joelson da Conceição Batista

Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Suzan Sousa de Vasconcelos

## DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Submetida em satisfação parcial dos requisitos ao grau de

MESTRE EM CIÊNCIAS

EM

GEOFÍSICA

ao

Conselho Acadêmico de Ensino

da

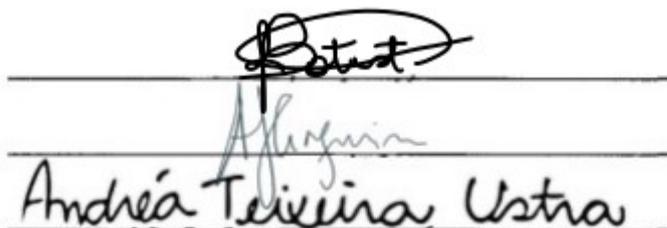
Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora

Dr. Joelson da Conceição Batista

Dr. Alexandro Guerra Cerqueira

Dra. Andréa Teixeira Ustra



Handwritten signatures of the examiners: Joelson da Conceição Batista, Alexandro Guerra Cerqueira, and Andréa Teixeira Ustra.

Aprovada em 30 de setembro de 2024

A presente pesquisa foi desenvolvida no Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e de Meio Ambiente da UFBA, com recursos próprios, da CAPES, FEP e do IGEO-UFBA.

S586 Silva, Pablo Uale de Carvalho,  
Caracterização Geofísica Multimétodos de Aterros Sanitários  
/ Pablo Uale de Carvalho Silva. — Salvador, 2024.  
105 f.

Orientador: Prof. Dr. Joelson da Conceição Batista  
Co-orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Suzan Sousa de Vasconcelos  
Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geofísica. Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia, 2024.

1. Geofísica. 2. Aterro Sanitário. 3. Métodos Elétricos. 4. Métodos Eletromagnéticos. I. Batista, Joelson da Conceição. II. Vasconcelos, Suzan Sousa de. III. Universidade Federal da Bahia. IV. Título.

CDU:550.3:628.472.3

Dedico primeiramente a Deus por  
ter me permitido vencer essa  
batalha e minha família, meus pais,  
irmãs, sobrinhos e namorado.  
Obrigado a todos por ter  
contribuído e serem minha fortaleza  
para continuar.

# Resumo

Esta dissertação apresenta os resultados de uma investigação geofísica realizada em dois aterros sanitários: o Aterro de Camaçari e o Aterro Metropolitano Centro. Esses dois aterros possuem características distintas quanto ao planejamento, instalação e desenvolvimento das atividades de disposição dos resíduos. No primeiro, as informações construtivas da cava de resíduos foram perdidas, enquanto, no segundo, foi realizado um serviço de monitoramento e caracterização histórica dos resíduos e de sua estrutura. A necessidade de utilizar um método indireto eficaz para delinear o fundo da cava, bem como os volumes internos, motivou uma abordagem multifísica para este estudo, realizada a partir do uso dos métodos geofísicos de Eletrorresistividade, Radar de Penetração no Solo e Eletromagnético de Frequência Muito Baixa (*Very Low Frequency*). Os três métodos apresentam diferentes profundidades de investigação e resoluções espaciais, atuando de forma complementar no mapeamento. Os perfis de resistividade permitiram o delineamento parcial da estrutura impermeável de argila compactada, instalada no fundo da cava durante a sua construção. Além disso, destacaram volumes resistivos possivelmente associados à presença de biogás e volumes condutivos produzidos pelo acúmulo de chorume e/ou zonas bioativas em porções mais profundas do maciço. Também permitiram a delimitação das camadas de cobertura final e impermeabilização, a identificação das características de células antigas no Aterro Metropolitano Centro e a observação de respostas distintas do método eletromagnético para resíduos dispostos em diferentes períodos. As distribuições de densidade de corrente obtidas pelo VLF possibilitaram uma extrapolação parcial da continuidade da estrutura impermeabilizante de fundo, além de indicar o aumento da condutividade em determinadas áreas. O método GPR complementou a investigação ao fornecer informações rasas, até cerca de 5 metros de profundidade, permitindo a identificação de tubulações referentes à rede de drenagem do aterro, zonas de solo condutivo nas laterais da pilha de resíduos, detalhes sobre a camada de cobertura final e sua impermeabilização, bem como informações sobre os resíduos sólidos mais superficiais.

# Abstract

This dissertation presents the results of a geophysical investigation in two landfills: the Camaçari Landfill and the Metropolitan Centro Landfill. These two landfills have distinct characteristics regarding the planning, installation, and development of waste disposal activities. In the first, the construction information of the waste pit was lost. In contrast, a historical monitoring and characterization service of the waste and its structure was carried out in the second. The need to use an effective indirect method to delineate the bottom of the pit, as well as the internal volumes, motivated a multiphysical approach for this study, carried out using the geophysical methods of Electroresistivity, Ground Penetrating Radar (GPR) and Very Low Frequency Electromagnetic (VLF). The three methods present different investigation depths and spatial resolutions, acting in a complementary way in the mapping. The resistivity profiles allowed the partial delineation of the impermeable structure of compacted clay installed at the bottom of the pit during its construction. Furthermore, they highlighted resistive volumes possibly associated with biogas and conductive volumes produced by accumulated leachate and/or bioactive zones in deeper portions of the massif. They also allowed the delimitation of the final cover and waterproofing layers, the identification of the characteristics of old cells in the Aterro Metropolitan Centro, and the observation of distinct responses of the electromagnetic method for waste disposed of in different periods. The current density distributions obtained by the VLF allowed a partial extrapolation of the continuity of the bottom waterproofing structure, in addition to indicating increased conductivity in certain areas. The GPR method complemented the investigation by providing shallow information, up to approximately 5 meters deep, allowing the identification of pipes related to the landfill drainage network, zones of conductive soil on the sides of the waste pile, details about the final cover layer, and its waterproofing, as well as information about the most superficial solid waste.

# Índice

Resumo . . . . .	4
Abstract . . . . .	5
Índice . . . . .	6
Índice de Tabelas . . . . .	8
Índice de Figuras . . . . .	9
Introdução . . . . .	14
<b>1 Aspectos Geológicos e Geotécnicos . . . . .</b>	<b>16</b>
1.1 Aspectos de Geologia Regional dos Aterros . . . . .	16
1.2 Aspectos Geotécnicos de Aterros Sanitários . . . . .	19
1.3 Localização e Caracterização das Áreas do Estudo . . . . .	21
1.3.1 Aterro Sanitário de Camaçari - ASC . . . . .	21
1.3.2 Aterro Metropolitano Centro - AMC . . . . .	23
<b>2 Metodologia . . . . .</b>	<b>27</b>
2.1 Equações de Maxwell . . . . .	27
2.1.1 Equações de Maxwell no Domínio da Frequência . . . . .	28
2.1.2 Relações Constitutivas e Equações de Helmholtz . . . . .	29
2.2 Eletrorresistividade . . . . .	31
2.2.1 Fundamentos . . . . .	31
2.2.2 Inversão de dados de eletrorresistividade . . . . .	36
2.3 Método VLF . . . . .	38
2.3.1 Princípios e Aplicações do VLF . . . . .	38
2.3.2 Modo de operação . . . . .	40
2.3.3 Características da Aquisição . . . . .	42
2.3.4 Tratamento e Interpretação de Dados . . . . .	44

2.4	Método GPR . . . . .	45
2.4.1	Tipos de Antena . . . . .	46
2.4.2	Propriedade Dielétrica . . . . .	46
2.4.3	Técnicas de aquisição de dados . . . . .	48
2.4.4	Etapas do processamento . . . . .	50
<b>3</b>	<b>Procedimentos para Coleta e Análise dos Dados . . . . .</b>	<b>54</b>
3.1	Aquisição, Processamento e Interpretação dos Dados do Aterro Sanitário de Camaçari . . . . .	54
3.1.1	Aquisição dos Dados . . . . .	55
3.1.2	Processamento e Interpretação dos Resultados . . . . .	56
3.1.3	Interpretação Conjunta: ER-VLF . . . . .	73
3.1.4	Interpretação Conjunta: GPR-VLF . . . . .	73
3.2	Aquisição, Processamento e Interpretação dos Dados do Aterro Sanitário Metropolitanamente Centro . . . . .	74
3.2.1	Aquisição de Dados . . . . .	74
3.2.2	Processamento e Interpretação dos Resultados . . . . .	76
3.2.3	Interpretação conjunta: ER-VLF . . . . .	88
<b>4</b>	<b>Conclusões . . . . .</b>	<b>89</b>
	<b>Agradecimentos . . . . .</b>	<b>91</b>
	<b>Apêndice A Dados Brutos . . . . .</b>	<b>92</b>
A.0.1	Perfis de VLF do Aterro Sanitário de Camaçari . . . . .	92
A.0.2	Perfis de VLF do Aterro Metropolitanamente Centro . . . . .	93
A.1	Perfis de GPR . . . . .	94
A.1.1	Perfis de GPR do Aterro Sanitário de Camaçari . . . . .	95
A.1.2	Perfis de GPR do Aterro Sanitário Metropolitanamente Centro . . . . .	96
	<b>Referências Bibliográficas . . . . .</b>	<b>99</b>

# Índice de Tabelas

2.1	Tabela de Frequência e Aplicações do GPR . . . . .	46
2.2	Constantes dielétricas relativas e velocidade das ondas para alguns materiais geológicos e artificiais. . . . .	49

# Índice de Figuras

1.1	Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo. . . . .	17
1.2	Seção geológica esquemática do compartimento sul da Bacia do Recôncavo, com geometria de semi-graben, e as sequências sedimentares. . . . .	18
1.3	Aterro Sanitário em diversas fases e seus sistemas. . . . .	19
1.4	Geomanta sendo utilizada para cobertura e impermeabilização após conclusão do talude da Célula. . . . .	21
1.5	Localização do Aterro Sanitário de Camaçari. . . . .	22
1.6	Foto retirada no Aterro Sanitário de Camaçari, ao lado de uma cava em implantação com vista ao fundo de uma célula mais antiga com disposição de novos resíduos. . . . .	23
1.7	Localização do Aterro Metropolitano Centro. . . . .	24
1.8	Fotografia tirada da berma de uma das células do AMC com vista para usina termelétrica. . . . .	25
1.9	Corte de estrada próximo ao AMC na qual é possível ver duas zonas distintas de solo da Formação Barreiras. . . . .	26
2.1	Cilindro condutor homogêneo em que $L$ é seu comprimento e $S$ é a área da sua seção transversal . . . . .	32
2.2	Linhas de campo elétrico partindo de uma fonte pontual de corrente na superfície de um semi-espaço homogêneo: (a) Superfície equipotencial hemisférica e (b) linhas de campo saindo e entrando normal às superfícies equipotenciais da fonte e receptor. . . . .	32
2.3	Configuração usualmente utilizada em campo na aquisição de dados elétricos, com injeção de corrente e medida de potencial. . . . .	33
2.4	Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo dipolo-dipolo . . .	37
2.5	Principais transmissores VLF. Localização, códigos das estações (e.g. NAA), frequências em kHz e potência em MW. . . . .	39
2.6	Campos eletromagnéticos gerados por um transmissor de ondas de rádio VLF e seu comportamento. . . . .	39

2.7	A projeção da elipse de polarização devido o campo magnético, o qual possui componentes $H_z$ e $H_x$ , pode ser entendido da seguinte forma: (A) Campo secundário orientado a um ângulo $\beta$ no espaço, em relação ao campo primário. (B) As componentes vertical, $R_y$ , e horizontal, $R_x$ , da resultante do somatório dos vetores do campo primário e secundário. (C) A elipse de polarização inclinada a um <i>tilt angle</i> $\theta$ em relação a horizontal. . . . .	41
2.8	(a)Resposta do VLF-EM para o esquema de uma feição geológica condutora vertical e linear na direção do transmissor. (b) Esquema demonstrativo do princípio do sistema de prospecção VLF-EM para uma feição geológica condutora vertical e linear na direção do transmissor, com indicação dos campos primários e secundários. . . . .	43
2.9	Velocidade das ondas de radar em função da constante dielétrica relativa . . . . .	47
2.10	Principais técnicas de aquisição de dados de GPR. A)Afastamento constante; B)WARR; C)CMP; D)Transiluminação ou tomografia. . . . .	51
2.11	Fluxograma do processamento básico de GPR . . . . .	52
3.1	Mapa de localização do Aterro de Camaçari mostrando os perfis geofísicos e outras feições do aterro. . . . .	55
3.2	Imagens do levantamento de dados de (a) ER, (b) VLF e (c) GPR. . . . .	56
3.3	Perfil 01 transversal de Eletrorresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparene e calculada e a seção de resistividade com a topografia. . . . .	57
3.4	Perfil 02 longitudinal de Eletrorresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparene e calculada e a seção de resistividade com a topografia. . . . .	59
3.5	Perfil 01 lateral de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 01 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos ( <i>Tilt</i> ), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjellt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto. . . . .	60
3.6	Perfil 02 lateral de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos ( <i>Tilt</i> ), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjellt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto. . . . .	61

3.7	Perfil 03 transversal de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 03 disposto transversalmente à área de estudo. Dados medidos ( <i>Tilt</i> ), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjell). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto. . . . .	62
3.8	Trecho 1 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	64
3.9	Trecho 2 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	65
3.10	Trecho 3 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	67
3.11	Trecho 4 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	68
3.12	Trecho 5 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	69
3.13	Trecho 6 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	70
3.14	Trecho 7 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	71
3.15	Trecho 8 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente. . . . .	72
3.16	Interpretação da distribuição de resistividades do Perfil 01 transversal de Eletroresistividade com extrapolação auxiliada pelo dado de VLF. . . . .	73
3.17	Interpretação da distribuição de resistividades do Perfil 02 longitudinal de Eletroresistividade, com extrapolação auxiliada pelo dado de VLF. . . . .	73
3.18	Comparação entre o radagrama do Perfil 3 e a pseudoseção obtida pelo filtro Karous para fins de interpretação. . . . .	74

3.19	Mapa de localização do Aterro Metropolitano Centro mostrando a localização das linhas de perfis geofísicos levantadas, uma de ER, três de GPR e duas de VLF . . . . .	75
3.20	Imagens do levantamento de dados de (a) ER, (b) VLF e (c) GPR. . . . .	76
3.21	Perfil 01 de Eletrorresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparente e calculada indicando os dados considerados espúrios. . . . .	77
3.22	Layout do Aterro Metropolitano Centro, baseado no projeto executivo. . . . .	77
3.23	Croqui do que seria um perfil cortando a atual célula localizada na antiga Etapa I, do Aterro Metropolitano Centro. . . . .	78
3.24	Um dos drenos responsáveis por conduzir o biogás para a usina termelétrica do AMC. . . . .	78
3.25	Perfil 01 de Eletrorresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparente e calculada, sem os dados espúrios, e a seção de resistividade com a topografia. . . . .	79
3.26	Perfil 01 lateral de VLF adquirido no Aterro Metropolitano Centro, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos ( <i>Tilt</i> ), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjell). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto. . . . .	80
3.27	Perfil 02 lateral de VLF adquirido no Aterro Metropolitano Centro, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos ( <i>Tilt</i> ), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjell). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto. . . . .	82
3.28	Imagem da aquisição de dados, onde é possível verificar (a) a situação superficial do solo (com água, úmido e saturado) do Perfil DD' e do (b) Perfil CC' antes da água. . . . .	83
3.29	Perfil CC' gerado pelo método GPR, destacando um trecho coincidente com a direção e sentido do Perfil 02 de VLF. Os seguintes atributos sísmicos foram aplicados, na ordem: frequência instantânea, envelope e fase instantânea. . . . .	84
3.30	O Perfil DD', gerado pelo método GPR, mostra um trecho que coincide com a direção e o sentido do Perfil 02 de VLF. Os seguintes atributos sísmicos foram aplicados, na ordem: frequência instantânea, envelope e fase instantânea. . . . .	85
3.31	Perfil EE' obtido pelo método GPR, mostrando um trecho coincidente com a direção e o sentido do Perfil 01 de VLF e ER. Apresenta, na seguinte ordem, os atributos sísmicos aplicados: frequência instantânea, envelope e fase instantânea. . . . .	87

3.32	Interpretação da distribuição de resistividades no Perfil 01 de eletrorresistividade, com extrapolação auxiliada pelos dados de VLF . . . . .	88
A.1	Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 1 no Aterro de Camaçari. Frequência de $24kHz$ . . . . .	92
A.2	Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 2 no Aterro de Camaçari. Frequência de $24kHz$ . . . . .	93
A.3	Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 3 no Aterro de Camaçari. Frequência de $24kHz$ . . . . .	93
A.4	Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 1 no Aterro Metropolitano Centro. Frequência de $24kHz$ . . . . .	94
A.5	Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 2 no Aterro Metropolitano Centro. Frequência de $24kHz$ . . . . .	94
A.6	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 1. . . . .	95
A.7	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 2. . . . .	95
A.8	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 3. . . . .	95
A.9	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 4. . . . .	96
A.10	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 5. . . . .	96
A.11	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 6. . . . .	97
A.12	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 7. . . . .	97
A.13	Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 8. . . . .	97
A.14	Dado bruto de GPR do Perfil CC' feito no Aterro Metropolitano Centro. . .	97
A.15	Dado bruto de GPR do Perfil DD' feito no Aterro Metropolitano Centro. . .	98
A.16	Dado bruto de GPR do Perfil EE' feito no Aterro Metropolitano Centro. . .	98

# Introdução

Os métodos geofísicos desempenham um papel fundamental no estudo e investigação de estruturas enterradas, em obras em diferentes estágios de seu ciclo de vida, além de pesquisas ambientais e geotécnicas. No que diz respeito ao estudo de áreas ambientalmente fragilizadas e afetadas, a geofísica, como uma metodologia multifísica de investigação, fornece importantes informações sobre as propriedades físicas da subsuperfície, utilizando métodos como sísmica de refração e reflexão, eletrorresistividade, magnetometria e eletromagnetismo. Ao aplicar essas técnicas, é possível obter dados sobre propriedades físicas como módulos de elasticidade, resistividade, permissividade elétrica, velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas, densidade de corrente, entre outras. As aplicações incluem o mapeamento de camadas rasas na subsuperfície e a caracterização de áreas propensas a vazamentos de materiais tóxicos e, conseqüentemente, à contaminação ambiental em obras de engenharia de controle ambiental. Em suma, essas técnicas proporcionam uma avaliação precisa e rápida, sendo essenciais para garantir a segurança e a sustentabilidade de projetos de engenharia.

Segundo a ABNT (1992), os aterros sanitários são estruturas de engenharia que utilizam técnicas específicas para a disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, com o objetivo de confiná-los em uma área mínima e reduzi-los ao menor volume possível. Isso é realizado cobrindo os resíduos com uma camada de terra em intervalos pré-estabelecidos, sem comprometer a saúde pública ou a segurança, e minimizando os impactos ambientais. Os aterros sanitários se mostram eficazes no tratamento e na recepção de resíduos sólidos, constituindo uma opção segura para a destinação e o controle adequado desses materiais. Os principais métodos utilizados para a investigação de aterros sanitários são os métodos elétricos e eletromagnéticos, como demonstram estudos realizados por Malagutti Filho et al. (1997) e Porciúncula (2021).

A maioria das investigações geofísicas aplicadas a aterro tem como objetivo avaliar e delimitar plumas de contaminação (Helene e Moreira (2021), Pereira e Lima (2018), Lago et al. (2006), Gallas et al. (2005), Stevanato et al. (2004)). Além disso, estudos em hidrogeologia, hidrogeofísica, contaminação e acomodação de resíduos em diversas fases de implantação de empreendimentos são abordados por autores como Vasconcelos e Santos (2023), Porciúncula

(2021), Laureano (2007) e Cavalcanti et al. (2001). Em aterros sanitários, os estudos geofísicos podem ser utilizados para estabelecer correlações entre os estágios de degradação da matéria orgânica no interior dos maciços, considerando o tempo de disposição dos resíduos e a resposta de potencial elétrico natural, permitindo a estimativa dos estágios das reações de oxidação e redução da matéria orgânica em decomposição (Moreira et al., 2013). Isso facilita a determinação da idade dos resíduos em aterros cuja documentação dos projetos de engenharia não pode ser recuperada, além de possibilitar o mapeamento de zonas de acúmulo de gás e chorume no interior do maciço (Moreira et al., 2015). Apesar dessas pesquisas, a contribuição técnico-científica sobre geofísica aplicada a aterros sanitários no Brasil ainda é limitada.

Dessa forma, além de contribuir com o aumento da produção científica sobre o tema, a presente dissertação visa investigar a possível presença de plumas de contaminação no subsolo, determinar a profundidade da cava do aterro, além de realizar a determinação e delimitação da geometria de aterros pretéritos ("paleoaterro") que foram cobertos pelo aterro atual. Também se propõe a analisar a dinâmica dos fluidos em seu interior (gases e chorumes) e a diferença de resposta entre resíduos novos e antigos. A pesquisa foi realizada em dois aterros sanitários na Região Metropolitana de Salvador: o Aterro Metropolitano Centro e o Aterro Sanitário de Camaçari. Este último está localizado na Central de Logística Ambiental do município de Camaçari, a 12 km da cidade, na estrada de acesso à CETREL - Central de Tratamento de Efluentes Líquidos. O Aterro Metropolitano Centro, por sua vez, está situado próximo à barragem de Ipitanga em Salvador, com acesso pela estrada CIA-Aeroporto, km 6,5. Para a caracterização, foram utilizadas as metodologias de eletrorresistividade, *Ground Penetrating Radar* (GPR) e *Very Low Frequency* (VLF).

# 1

## Aspectos Geológicos e Geotécnicos

Na presente pesquisa, os levantamentos geofísicos foram realizados na Região Metropolitana de Salvador, abrangendo os Aterros Sanitários Metropolitanos Centro e de Camaçari, ambos destinados a resíduos sólidos urbanos não perigosos. O Aterro Sanitário de Camaçari, operado pelo Grupo Naturalle, localiza-se na Avenida Atlântica, a 12 km do centro de Camaçari, e recebe cerca de 400 toneladas de resíduos mensais em uma área de  $250.000m^2$ , dos quais  $150.000m^2$  são destinados às células de recepção e tratamento de resíduos e  $100.000m^2$  a áreas verdes. Já o Aterro Metropolitanos Centro, administrado pela Empresa Battre, é responsável pela operação e manutenção da estação de transbordo que recebe resíduos urbanos de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas, além de gerenciar a disposição final desses resíduos no Aterro Metropolitanos Centro.

### 1.1 Aspectos de Geologia Regional dos Aterros

Do ponto de vista geológico, os Aterros Metropolitanos Centro e de Camaçari estão inseridos na Bacia do Recôncavo, formada durante o rifteamento relacionado à fragmentação da Gondwana (Eocretáceo) e à abertura do Oceano Atlântico (Jurássico Inferior ao Cretáceo Superior) (Magnavita et al., 2012). A Bacia, situada entre os paralelos  $11^{\circ}30'S$  e  $13^{\circ}00'S$ , abrange uma área de aproximadamente  $11.000km^2$  (Figura 1.1) e consiste em uma depressão crustal alongada na direção N-S, cobrindo partes da Bahia, Sergipe e Pernambuco (da Silva et al., 2007). Essa bacia apresenta rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano, depósitos Jurássico-Cretáceos, coberturas detríticas terciárias e sedimentos quaternários marinhos e aluviais, compondo um rifte intracontinental abortado. Sua arquitetura reflete um semi-graben orientado NE-SW (Figura 1.2), onde a falha na borda SE possui um rejeito superior

a 8.000 m. A configuração estrutural é dominada por falhas normais planas, com direção preferencial N30°E, que condicionam o mergulho regional das camadas para SE, em direção às áreas de maior profundidade do embasamento. O campo de tensões responsável pela atenuação e ruptura da crosta esteve ativo entre o Mesojurássico (cerca de 165 Ma) e o Eocretáceo (cerca de 115 Ma) (Milhomem et al., 2003).

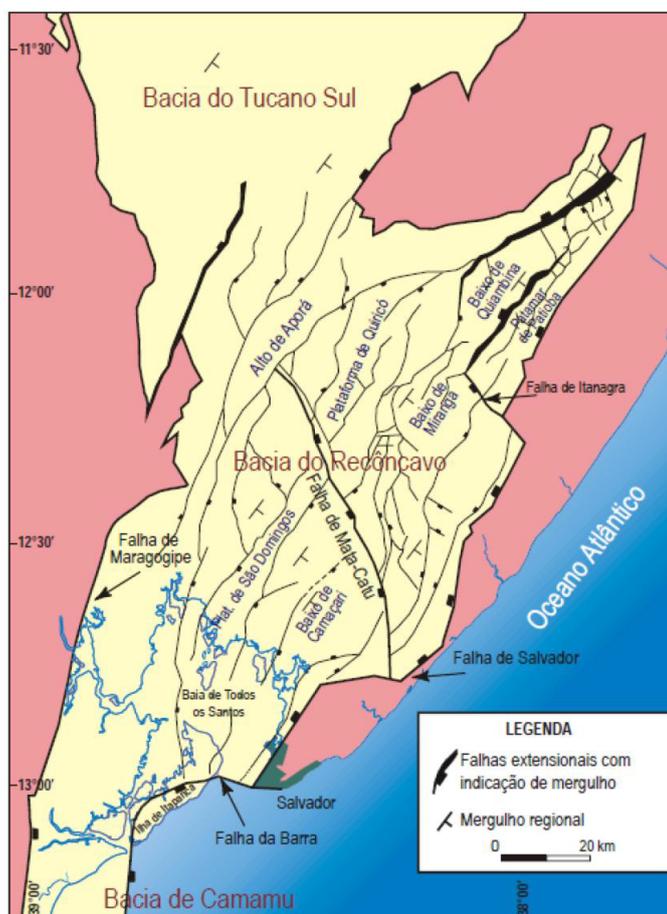


Figura 1.1: Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo.

Fonte: Milhomem et al. (2003).

Segundo Magnavita (1992) e Silva et al. (2007), o preenchimento sedimentar da Bacia do Recôncavo é dividido em quatro estágios: sinéclise, pré-rifte, rifte e pós-rifte. No estágio Sinéclise, representado pelos Membros Pedrão e Cazumba da Formação Afligidos, dados paleontológicos indicam uma idade Permiana para o Membro Pedrão, correlacionando-o com o Membro Ingá da Formação Santa Brígida e com as Formações Aracaré da Bacia de Sergipe-Alagoas. O Membro Pedrão é caracterizado por arenitos, lamitos e evaporitos, enquanto o Membro Cazumba apresenta pelitos e lamitos vermelhos lacustres com nódulos de anidrita. No estágio pré-rifte, a crosta permanece estável com subsidência lenta em ambiente marinho. As Formações Aliança e Sergi indicam um sistema fluvio-eólico desenvolvido durante o Neojurássico em clima árido. Dados paleontológicos sugerem que a Formação Água Grande foi

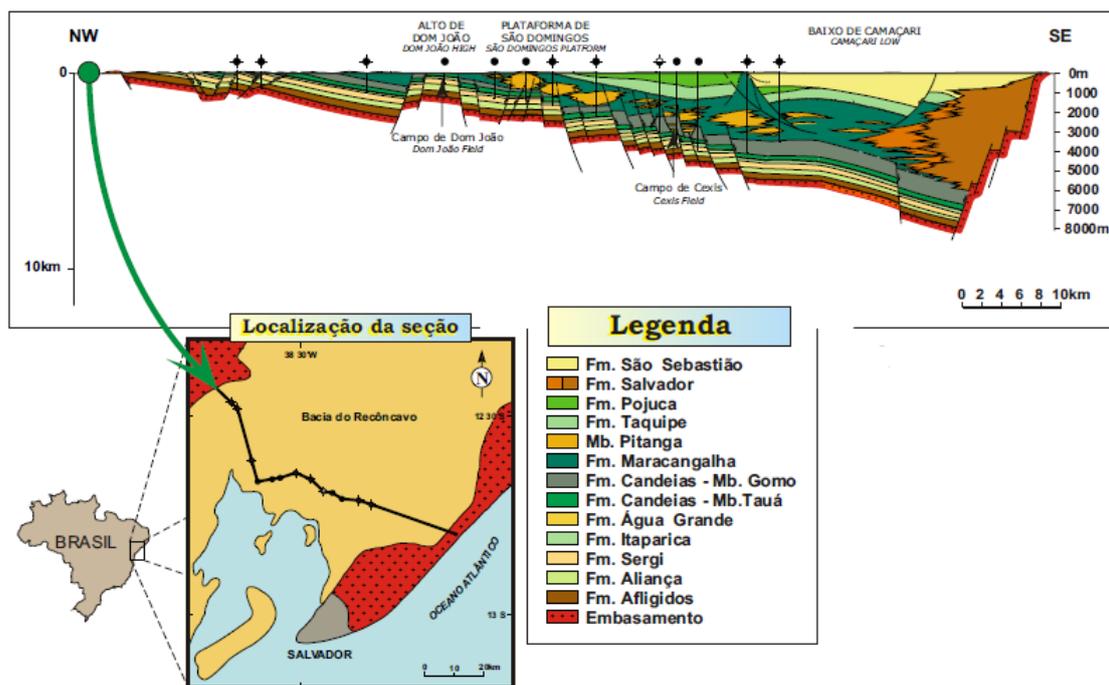


Figura 1.2: Seção geológica esquemática do compartimento sul da Bacia do Recôncavo, com geometria de semi-graben, e as sequências sedimentares. Modificado de Penteado (1999).

depositada no Eocretáceo, refletindo a configuração inicial da Bacia com incipiente controle tectônico (Meneses, 2010).

Durante o estágio rifte, a ruptura crustal e esforços distensivos levaram ao depósito da Formação São Sebastião (Cretáceo), marcando o assoreamento final da bacia com três sequências distintas de deposição. As discordâncias são bem definidas a oeste, no segmento flexural da bacia, sujeito a variações de nível de base relacionadas à tectônica e clima. Nos depocentros, limites são definidos por concordâncias relativas, com um padrão de empilhamento estratigráfico semelhante ao descrito por Silva et al. (2007). No estágio pós-rifte, há estabilização cratônica com subsidência térmica devido à segregação dos continentes. A Formação Marizal (Cretáceo) sobrepõe estratos horizontalmente depositados com discordância angular em relação às unidades anteriores, associando-se a sistemas aluviais em contexto de subsidência térmica pós-rifte (Meneses, 2010). No contexto do projeto, é interessante citar essas formações, pois são importantes fontes de recarga de água superficiais através dos aquíferos que se localizam nessas formações. A principal nesse contexto é a Formação São Sebastião.

## 1.2 Aspectos Geotécnicos de Aterros Sanitários

Em relação aos aspectos geotécnicos de aterros, é essencial descrever a implantação, as estruturas presentes e o tipo de resíduo depositado, que servirão de base para nossa investigação e interpretação. A Figura 1.3 ilustra etapas da construção e expansão de um aterro, destacando o sistema de drenagem e o padrão do fundo de cava em forma de trapézio. Adicionalmente, a dinâmica dos volumes de lixo soterrados cria um ambiente propício para a geração de biogás. Em aterros mais antigos, o biogás é drenado para a superfície e queimado, enquanto em aterros com infraestrutura mais moderna, pode ser utilizado para geração de energia em usinas termoelétricas.

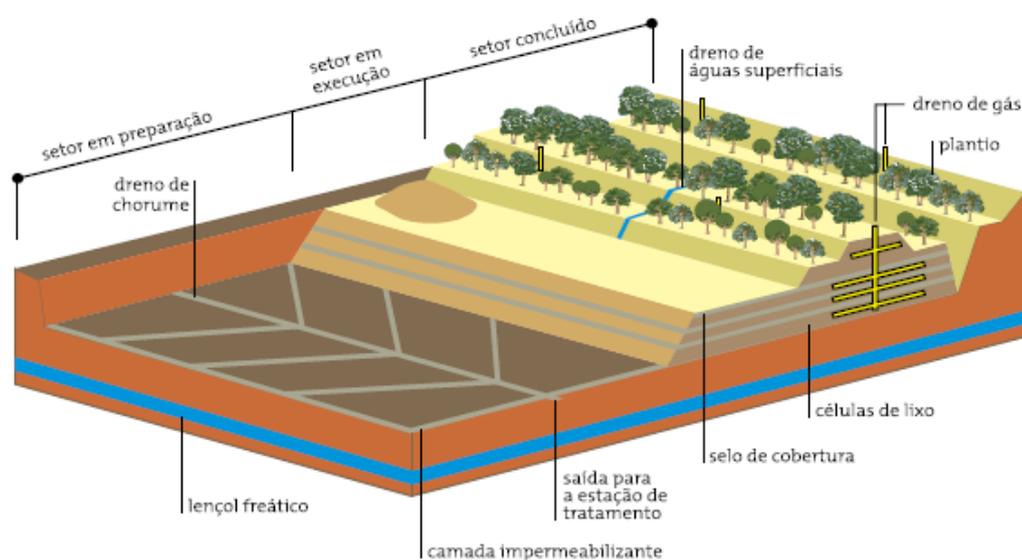


Figura 1.3: Aterro Sanitário em diversas fases e seus sistemas.

Fonte: IPT/CEMPRE (2000).

Referente a resíduos sólidos, estes são materiais descartados que perderam a utilidade para quem os gerou, incluindo detritos, lixos e produtos secundários sem demanda econômica, que necessitam de disposição (Bosco, 2008). Esses resíduos podem estar nas formas líquida, gasosa e sólida, e podem ser classificados como perigosos ou não perigosos. Conforme a ABNT (2004), resíduos são definidos como sólidos e semissólidos resultantes de atividades industriais, domésticas, hospitalares, comerciais, agrícolas, de serviços e de varrição, incluindo lodos de tratamento de água e líquidos que, devido às suas características, não podem ser descartados na rede pública de esgoto ou corpos d'água sem soluções técnicas e economicamente viáveis.

Para aterros sanitários, é essencial classificar os resíduos sólidos como perigosos ou não

perigosos. Os resíduos não perigosos são divididos em inertes e não inertes. Essa classificação permite o gerenciamento adequado, garantindo tratamento, transporte e disposição final apropriados. Resíduos perigosos são classificados como Classe I e podem representar riscos à saúde pública e ao meio ambiente devido às suas características químicas, físicas e infecto-contagiosas, como toxicidade, inflamabilidade, reatividade, corrosividade e patogenicidade. Já os resíduos não perigosos são classificados como Classe II, subdivididos em Classe II-A (não inertes) e Classe II-B (inertes). Os resíduos Classe II-A não se enquadram na Classe I nem na Classe II-B e apresentam propriedades como biodegradabilidade, combustibilidade e solubilidade em água. Por outro lado, os resíduos Classe II-B, quando testados com água destilada ou deionizada, não apresentam solubilização de constituintes além dos padrões de potabilidade, exceto aspectos de cor, turbidez, dureza e sabor. No caso do Aterro Sanitário de Camaçari, ele está apto para receber resíduos das Classes II-A (não inertes) e II-B (inertes), enquanto o Aterro Metropolitano Centro é adequado apenas para resíduos da Classe II-A (não inertes) (ABNT, 2004).

Um aterro sanitário é composto por diversas estruturas projetadas para garantir a disposição segura e sustentável dos resíduos sólidos. As etapas típicas de sua construção incluem: seleção do local, estudos ambientais e licenciamento, projeto e engenharia, preparação do terreno, instalação da infraestrutura, construção das células de disposição, monitoramento e controle ambiental, operação inicial e encerramento, e pós-fechamento. Em relação ao corpo do aterro, sua construção envolve o revestimento da área escolhida para disposição dos resíduos sólidos com uma base composta por camadas de solo e impermeabilização. O aterro é estruturado em células de 2 a 4 metros de altura, com cada célula possuindo drenagem na base. O topo do aterro recebe um sistema de impermeabilização e cobertura final, que inclui camadas de drenagem e impermeabilização (ver Figura 1.4), além de um sistema de drenagem superficial com canaletas e escadas d'água para águas pluviais e drenos verticais para o escape dos gases resultantes da decomposição anaeróbia do lixo (Bosco, 2008). Outras estruturas de apoio necessárias incluem cercas, telas, guaritas, estradas de acesso, praças de descarga, instalações administrativas e de fiscalização, balança com capacidade mínima de 30 toneladas, sistema de iluminação noturna, pátio para materiais (brita, areia, terra), e, eventualmente, dormitório, almoxarifado, instalações sanitárias e cozinha.



Figura 1.4: Geomanta sendo utilizada para cobertura e impermeabilização após conclusão do talude da Célula.

## 1.3 Localização e Caracterização das Áreas do Estudo

### 1.3.1 Aterro Sanitário de Camaçari - ASC

O Aterro Sanitário de Camaçari localiza-se no município de Camaçari, na região metropolitana de Salvador (Figura 1.5). Este aterro é uma Central de Tratamento e Valorização de Resíduos (CTRV), que realiza a triagem, separação e disposição adequada de resíduos sólidos urbanos (Figura 1.6). A CTRV controla impactos ambientais, trata o chorume, mas não aproveita o gás metano, sendo este queimado, e segue a legislação ambiental brasileira, incluindo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei 12.305/2010), que visa eliminar lixões nas cidades.

A CTRV de Camaçari baseia-se nos conceitos de ecoeficiência e logística reversa, com

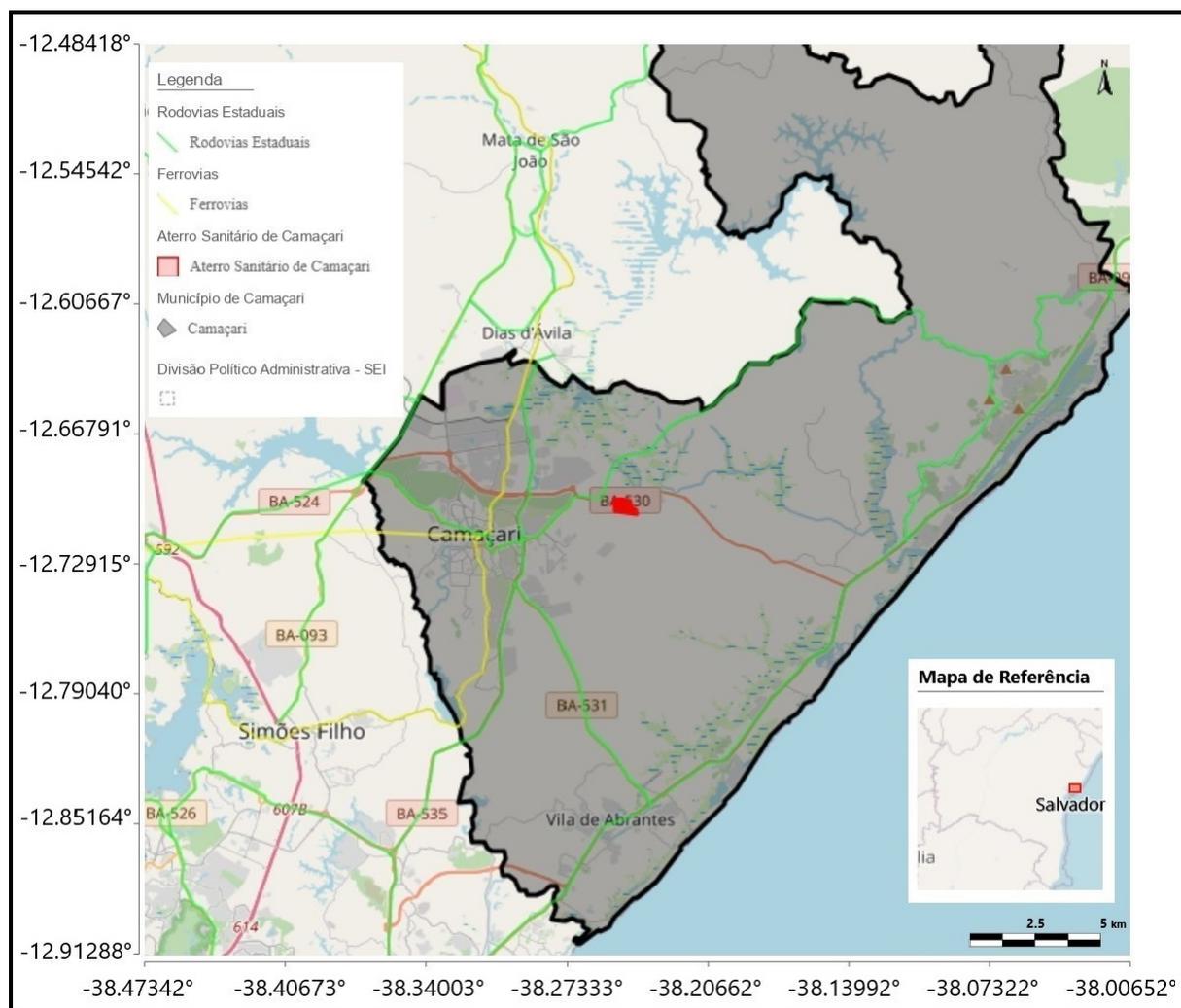


Figura 1.5: Localização do Aterro Sanitário de Camaçari.

o objetivo de tratar e reaproveitar os resíduos coletados, devolvendo-os à cadeia produtiva. Um exemplo disso é a unidade de beneficiamento de entulho, que produz material reutilizado nas vias de acesso do município. Outro exemplo é a geração de energia ou combustível para indústrias, por meio do aproveitamento do biogás. O aterro, operado pela Naturalle no município de Camaçari, está localizado na Avenida Atlântica, s/n, e recebe mensalmente cerca de 400 toneladas de resíduos classe II B (não perigosos e inertes) e a mesma quantidade de resíduos classe II A (não perigosos e não inertes) (Naturalle, 2024).

Litologicamente, o ASC está situado sobre os sedimentos que compõem o sistema aquífero Marizal - Formação São Sebastião da Bacia do Recôncavo (Cretáceo Inferior, Barremiano-Aptiano). Essas rochas são formadas por sedimentos arenosos pobremente selecionados, de granulação fina a média, com níveis grosseiros na base, apresentando coloração amarelo-avermelhada, e são intercaladas com argilas ricas em silte. Predominam duas formações: a Formação São Sebastião, composta por uma sequência espessa de arenitos esbranquiçados,



Figura 1.6: Foto retirada no Aterro Sanitário de Camaçari, ao lado de uma cava em implantação com vista ao fundo de uma célula mais antiga com disposição de novos resíduos.

de granulação média a fina, e a Formação Marizal, caracterizada por arenitos argilosos, caulíníticos, com finas camadas de siltitos e folhelhos.

Essas formações, especialmente a Formação São Sebastião, constituem um importante reservatório subterrâneo de água doce (Lima, 1999). A geologia dessas rochas influencia diretamente na capacidade de armazenamento e na dinâmica do fluxo da água subterrânea, desempenhando um papel essencial no abastecimento de água da região (Ghignone, 1979).

### 1.3.2 Aterro Metropolitano Centro - AMC

O Aterro Sanitário Metropolitano Centro está situado em Salvador, à margem direita da Rodovia BA-256, no sentido de São Cristóvão, próximo ao acesso à Via Metropolitana e à Barragem de Ipitanga (Figura 1.7).

O AMC é operado pela BATTRE, responsável pelos serviços de operação e manutenção da estação de transbordo. Esta estação tem como objetivo receber toda a coleta de resíduos sólidos urbanos da cidade de Salvador, além de implantar, operar e manter o Aterro Metropolitano Centro, destinado à disposição final de resíduos sólidos urbanos dos municípios de Salvador, Simões Filho e Lauro de Freitas (BATTRE, 2024). O ASMC atende uma população de 2,7 milhões de habitantes em Salvador, 131 mil habitantes em Simões Filho e 195 mil habitantes em Lauro de Freitas. Dessa quantidade, é gerada uma média de resíduos

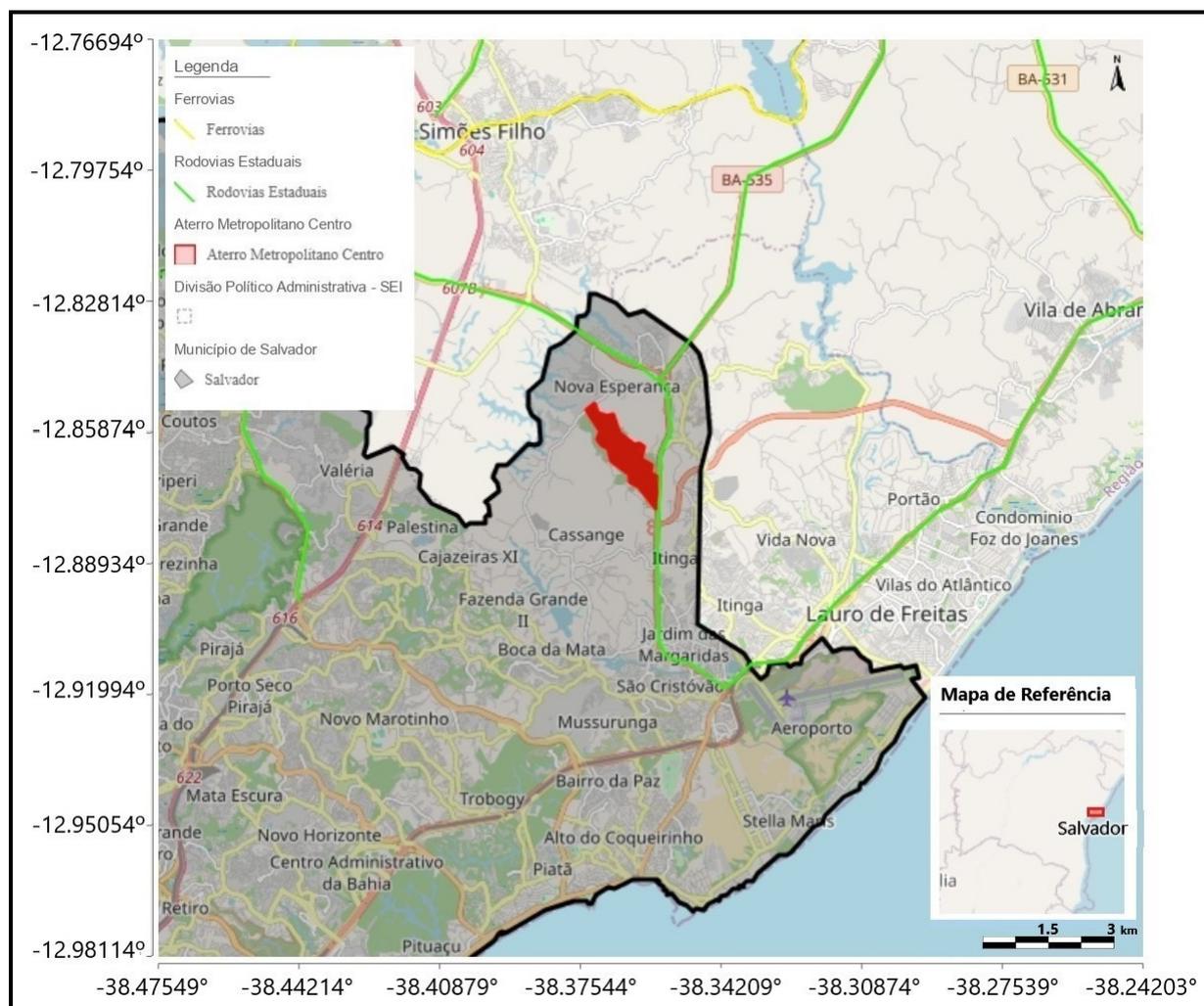


Figura 1.7: Localização do Aterro Metropolitano Centro.

transportados da Estação de Transbordo para o Aterro, variando entre 58.000 e 60.000 toneladas por mês. A quantidade média de resíduos recebidos mensalmente no aterro, segundo (BATTRE, 2024), é de 75.000 a 80.000 toneladas por mês.

O AMC é o local destinado à disposição final de resíduos sólidos urbanos e foi projetado para receber e tratar o resíduo produzido pelos habitantes de Salvador, Lauro de Freitas e Simões Filho, com uma média de 3.000 toneladas de resíduos por dia. A disposição final de resíduos sólidos urbanos em aterros sanitários requer cuidados adicionais, tanto na concepção do projeto quanto na manutenção e operação. O processo de decomposição dos resíduos sólidos gera liberação de gases e líquidos (chorume ou percolato), resultando em poluentes. Por isso, um projeto de aterro sanitário exige cuidados como a impermeabilização do solo, monitoramento ambiental, e a implantação de sistemas de drenagem eficazes e eficientes, entre outros, para evitar a possível contaminação da água, do solo e do ar (BATTRE, 2024). Uma das ações do ASMC para promover a sustentabilidade foi a implantação e o

atual gerenciamento da usina termelétrica, que aproveita o biogás coletado pelo sistema de drenagem, gerado pela decomposição dos resíduos sólidos, para a geração de energia elétrica (Figura 1.8).



Figura 1.8: Fotografia tirada da berma de uma das células do AMC com vista para usina termelétrica.

Litologicamente, o AMC sanitário encontra-se sobre os sedimentos da Formação Barreiras e do cristalino pertencente ao embasamento da Bacia do Recôncavo. A Formação Barreiras é composta por sedimentos continentais pouco litificados, constituindo testemunhos de leques aluviais pliocênicos depositados discordantemente sobre o substrato cristalino, que inclui metamorfitos de alto e médio grau, como rochas das fácies anfibolito (Cavalcanti, 1999).

A Formação Barreiras é caracterizada por uma sequência de sedimentos terrígenos, pouco ou não consolidados, de cores variadas (Figura 1.9), composta por argilas, areias e cascalhos. A estratificação é irregular, normalmente indistinta e, em geral, afossilífera. Os arenitos são descritos como grosseiros, com grãos mal selecionados, subangulares a arredondados, e apresentam cores variadas, predominando o vermelho sobre o amarelo, branco e violeta, conforme a argila da matriz. Eles ocorrem em extensões apreciáveis e cortam, discordando das camadas inferiores, leitos de argila cinza, que podem apresentar manchas amareladas e/ou avermelhadas (Barbosa e Dominguez, 1996).

Adicionalmente, este aterro foi implantado na microbacia do rio Itinga, que integra a sub-bacia do Ipitanga, a qual faz parte da bacia hidrográfica do rio Joanes. Essas bacias têm importância crucial para o abastecimento de água de Salvador (Moraes et al., 1995).



Figura 1.9: Corte de estrada próximo ao AMC na qual é possível ver duas zonas distintas de solo da Formação Barreiras.

Vale ressaltar que toda a água proveniente do nível freático e dos riachos existentes na região delimitada pela área de operação do aterro tem como destino o rio Itinga (Souza, 2016).

# 2

## Metodologia

Os métodos geofísicos oferecem uma análise não destrutiva, rápida e econômica, permitindo a obtenção de informações detalhadas sobre a distribuição dos materiais na subsuperfície. Esses métodos têm evoluído significativamente com o avanço de computadores e softwares, possibilitando pré-visualizações gráficas de modelos unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais com alta precisão, o que contribui para interpretações cada vez mais realistas do meio estudado. Os dados interpretados permitem identificar e localizar as feições caracterizadas no espaço dimensional analisado. A avaliação do local de estudo nesta pesquisa foi realizada empregando o método de Eletrorresistividade (ER), *Very Low Frequency* (VLF) e *Ground Penetrating Radar* (GPR). Neste capítulo, abordaremos os principais aspectos teóricos relacionados a esta pesquisa.

### 2.1 Equações de Maxwell

Os métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos diferem em sua metodologia, principalmente por utilizarem, respectivamente, corrente contínua (CC) e corrente alternada (CA). O GPR e o VLF são métodos eletromagnéticos; o primeiro utiliza frequências de rádio e uma antena transmissora e receptora, enquanto o segundo emprega frequências muito baixas, utilizando apenas uma antena receptora. Por outro lado, o ER representa um método elétrico, utilizando corrente contínua para medir a resistividade aparente do meio estudado que é uma medida da resistividade média de um pacote de rochas e solo, em vez da resistividade de uma rocha ou camada individual, isto é, uma expressão da resistividade que o meio teria se fosse homogêneo.. Apesar das diferentes classificações, há semelhanças na origem conceitual desses métodos, pois a base teórica de todos eles se fundamenta nas Equações de Maxwell,

que descrevem o comportamento dos fenômenos eletromagnéticos. Para meios magnéticos e/ou polarizáveis, as Equações de Maxwell são definidas da seguinte forma:

$$\nabla \times \mathbf{e} = -\frac{\partial \mathbf{b}}{\partial t}, \quad (2.1)$$

$$\nabla \times \mathbf{h} = \mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t}, \quad (2.2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{d} = \rho, \quad (2.3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{b} = 0, \quad (2.4)$$

onde  $\mathbf{e}$  é o vetor campo elétrico (V/m),  $\mathbf{b}$  é o vetor indução magnética (T),  $\mathbf{j}$  é o vetor densidade de corrente elétrica (A/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{d}$  é o vetor deslocamento elétrico (C/m<sup>2</sup>),  $\mathbf{h}$  é o vetor campo magnético (A/m),  $\rho$  é a densidade de carga elétrica (C/m<sup>3</sup>) e  $t$  é o tempo (s).

Por definição, a Equação 2.1 é conhecida como Lei de Faraday e descreve o campo elétrico produzido pela variação do campo de indução magnética em relação ao tempo. Já a Equação 2.2 é conhecida como Lei de Ampère e relaciona o campo magnético com as correntes elétricas. As correntes de deslocamento  $\left(\frac{\partial \mathbf{d}}{\partial t}\right)$  estão associadas às cargas que se movem polarizadas pela influência de um campo elétrico externo. Durante esse movimento, ocorre uma transferência de energia do campo elétrico para o meio, liberando essa energia armazenada quando as cargas retornam à posição de equilíbrio após a remoção do campo elétrico. Por fim, a Equação 2.3 e a Equação 2.4 descrevem a Lei de Gauss para a eletricidade e o magnetismo, respectivamente.

As equações de Maxwell mostradas acima estão no domínio do tempo. Apesar de sua apresentação na forma diferencial, estas equações também podem ser expressas na forma integral e no domínio da frequência.

### 2.1.1 Equações de Maxwell no Domínio da Frequência

A aplicação do par de transformadas de Fourier, direta e inversa, descritas por (Ward e Hohmann, 1988), é dada pelas seguintes equações:

$$f(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} F(\omega) e^{i\omega t} d\omega, \quad (2.5)$$

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} f(t) e^{-i\omega t} dt, \quad (2.6)$$

essas equações possibilitam a transformação entre os domínios do tempo e da frequência. Ao aplicar a Equação 2.5 nas Equações 2.1, 2.2, 2.3 e 2.4, obtemos as Equações de Maxwell

no domínio da frequência:

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\omega\mathbf{B} = 0, \quad (2.7)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - i\omega\mathbf{D} = \mathbf{J}, \quad (2.8)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = Q_v, \quad (2.9)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2.10)$$

onde  $Q_v$  representa a densidade de carga elétrica.

## 2.1.2 Relações Constitutivas e Equações de Helmholtz

As equações de Maxwell estão desacopladas em equações diferenciais formadas por cinco funções vetoriais. Essas relações são empíricas e valem-se das propriedades elétricas e magnéticas dos materiais para relacionar o campo elétrico externo aplicado e o campo interno (Sato, 1999), o que permite a obtenção de informações sobre as propriedades elétricas do meio por onde as ondas se propagam. Essas relações constitutivas fornecem então uma descrição macroscópica (ou comportamento médio dado pela Lei das Misturas) de como os elétrons, átomos e moléculas se comportam na presença de um campo eletromagnético. No domínio da frequência, das três relações constitutivas, a primeira é conhecida como a Lei de Ohm (Equação 2.11):

$$\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E}. \quad (2.11)$$

Essa lei descreve a relação entre densidade de corrente elétrica e condutividade  $\sigma$ , isto é, o fluxo de cargas livres por corrente quando um campo elétrico está presente. A condutividade é expressa em  $S/m$ , mas é comum trabalhar com a unidade em  $mS/m$ , quando se trata de investigações rasas, como é o caso de GPR e representa capacidade de um material em conduzir corrente elétrica. Em meios isotrópicos a condutividade é uma grandeza escalar enquanto que em meios anisotrópicos ela é um tensor. Ao cessar o campo elétrico, cessa o movimento das cargas que, para ambientes geológicos rasos, tem como formas mais importantes os elétrons dos minerais metálicos e os íons contidos nas soluções eletrolíticas presentes nos poros, fissuras e fratura das rochas. Esse fenômeno é conhecido como corrente de condução. A condutividade elétrica afeta diretamente a atenuação das ondas do radar e é um parâmetro importantíssimo que deve ser observado na aplicação do GPR.

A segunda relação constitutiva é uma relação linear que analisa a dependência entre o vetor deslocamento elétrico  $\mathbf{D}$  e o vetor campo elétrico  $\mathbf{E}$ :

$$\mathbf{D} = \varepsilon\mathbf{E}, \quad (2.12)$$

sendo a permissividade dielétrica  $\varepsilon$  a propriedade que caracteriza o deslocamento de cargas ligadas na estrutura de um material ou meio que está sob influência de um campo elétrico. A aplicação de um campo elétrico em um meio, causa um deslocamento de cargas resultando no armazenamento de energia no material. Quando este campo elétrico é removido, as cargas tendem a voltar para suas posições de equilíbrio liberando energia. Porém, o parâmetro mais utilizado é a permissividade relativa ou constante dielétrica ( $\varepsilon_r$ ), que é a razão entre a permissividade do material e a permissividade do vácuo, tal que  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12} F/m$  (Annan e Cosway, 1992):

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}. \quad (2.13)$$

No ambiente terrestre,  $\varepsilon_r$  é fortemente controlado pela presença de água, podendo apresentar variações de quase duas ordem de grandeza (de 1 a 80).

A terceira relação constitutiva se baseia na relação entre o vetor indução magnética ( $\mathbf{B}$ ) e o vetor campo magnético ( $\mathbf{H}$ ), tal que:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (2.14)$$

onde  $\mu$  é a permeabilidade magnética, a qual descreve como os momentos magnéticos dos átomos e das moléculas respondem a um campo magnético. Para a maioria dos materiais terrestres pode-se considerar que  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} H/m$ , que é a permeabilidade magnética do vácuo. Sendo assim a permeabilidade relativa é  $\mu_r = \mu/\mu_0 = 1$ .

Considerando as Equações 2.7 e 2.8, juntamente com às relações constitutivas no domínio da frequência, obtém-se as equações acopladas:

$$\nabla \times \mathbf{E} + i\mu\omega \mathbf{H} = 0, \quad (2.15)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - (\sigma + i\epsilon\omega)\mathbf{E} = 0. \quad (2.16)$$

Desta forma, o termo  $\sigma\mathbf{E}$  representa a corrente de condução e o termo  $i\epsilon\omega\mathbf{E}$  a corrente de deslocamento devido a variação temporal do campo elétrico. Uma forma mais compacta para as Equações 2.15 e 2.16 pode ser obtida a partir dos termos de impeditividade  $\hat{z}$  ( $\hat{z} = i\mu\omega$ ) e admissibilidade  $\hat{y}$  ( $\hat{y} = \sigma + i\epsilon\omega$ ) (Ward e Hohmann, 1988), tal que:

$$\nabla \times \mathbf{E} + \hat{z}\mathbf{H} = 0, \quad (2.17)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} - \hat{y}\mathbf{E} = 0, \quad (2.18)$$

substituindo uma equação na outra e vice-versa, obtém-se como resultado:

$$\nabla \times \nabla \mathbf{H} + ik^2 \mathbf{H} = 0, \quad (2.19)$$

$$\nabla \times \nabla \mathbf{E} + ik^2 \mathbf{E} = 0, \quad (2.20)$$

onde  $k^2 = -\widehat{z}\widehat{y} = \mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega$ , sendo que  $\omega$  é a frequência angular e  $f$  é a frequência linear, tal que  $\omega = 2\pi f$ . Ao considerar a identidade abaixo,

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla \cdot \nabla \mathbf{A} = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}, \quad (2.21)$$

é possível utilizá-la nas Equações 2.19 e 2.20 considerando regiões sem fonte de campo  $\mathbf{E}$  e  $\mathbf{H}$  ( $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$  e  $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ). Após algumas simplificações, as equações de Helmholtz podem ser expressas por:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + k^2 \mathbf{E} = 0, \quad (2.22)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + k^2 \mathbf{H} = 0. \quad (2.23)$$

Nesta equação, os parâmetros  $\sigma$ ,  $\mu$  e  $\epsilon$  podem variar com a frequência. A condutividade elétrica, a permeabilidade e a permissividade dielétrica são quantidades tensoriais e podem ser não lineares. No entanto, para os levantamentos geofísicos, os meios são considerados homogêneos, isotrópicos e lineares. Por isso, essas propriedades são tratadas como quantidades escalares e independentes do campo eletromagnético aplicado ao meio. Em geral, a condutividade é dominante para ondas eletromagnéticas de baixa frequência ( $< 1$  MHz), enquanto a permissividade dielétrica é dominante para ondas de alta frequência ( $> 1$  MHz) (Ward e Hohmann, 1988).

## 2.2 Eletrorresistividade

O método de eletrorresistividade pertence ao grupo dos métodos geofísicos de prospecção, que inclui os métodos elétricos e eletromagnéticos (Ward, 1990; Zhdanov e Keller, 1994). Os dados utilizados nesta pesquisa foram coletados em campo pelo projeto, em colaboração com empresas de aterros. O equipamento é da universidade e as medições foram analisadas em software comercial disponível na instituição, com suporte adicional de linguagens de programação conforme necessário.

### 2.2.1 Fundamentos

Se considerarmos um condutor cilíndrico homogêneo (Figura 2.1) no qual  $S$  é a área de sua seção transversal e  $L$  é o seu comprimento, com base na Segunda Lei de Ohm, podemos definir a relação entre resistividade ( $\rho$ ) e a resistência ( $R$ ), fornecida pela equação abaixo:

$$\rho = R \frac{S}{L}, \quad (2.24)$$

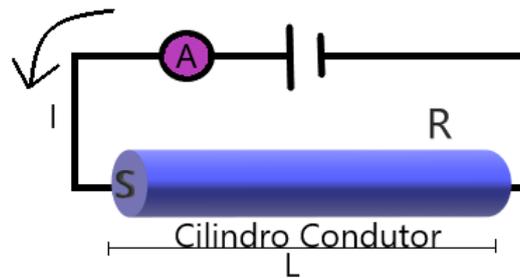


Figura 2.1: Cilindro condutor homogêneo em que  $L$  é seu comprimento e  $S$  é a área da sua seção transversal

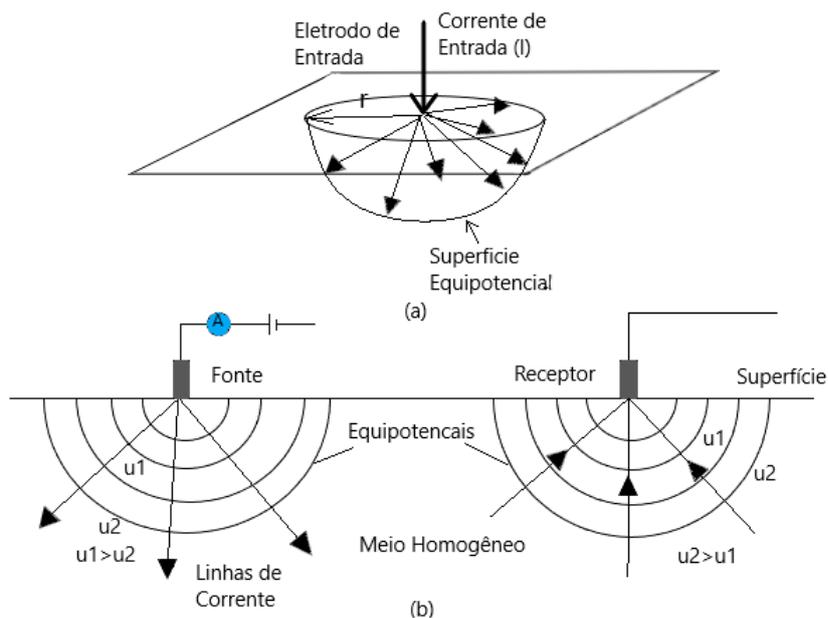


Figura 2.2: Linhas de campo elétrico partindo de uma fonte pontual de corrente na superfície de um semi-espço homogêneo: (a) Superfície equipotencial hemisférica e (b) linhas de campo saindo e entrando normal às superfícies equipotenciais da fonte e receptor.

Adaptado de Gonçalves (2016) e Leão (2019)

Ao considerar um meio tridimensional, o fluxo de corrente  $I$  que se propaga através de um eletrodo na superfície de um semi-espço isotrópico e uniforme se dá pelo contato entre eletrodo e a superfície da Terra (Figura 2.2), não sendo esta um isolante perfeito. Esse ponto de contato atua como fonte de corrente dispersando essas para fora. As linhas de campo elétrico são normais às superfícies equipotenciais (forma hemisférica) e paralelas ao fluxo de corrente (Lowrie e Fichtner, 2020).

Considerando que a resistividade do solo é uniforme é possível mapear um padrão de fluxo de corrente, que refletirá a distribuição da resistividade em subsuperfície. Esse padrão pode ser medido e posteriormente mapeado com voltímetros conectados a dois eletrodos de potencial. Quando são detectados valores fora dos padrões esperados para um solo homogêneo é

possível a partir deles, inferir quanto à forma e propriedades elétricas das heterogeneidades em subsuperfície. O procedimento usual de aquisição de dados é visto na Figura 2.3, na qual são utilizadas quatro eletrodos: dois de corrente e dois de potencial. A profundidade de investigação depende da penetração da corrente que aumenta com a maior distância de separação entre os eletrodos de corrente, sendo assim uma questão a ser estudada e investigada para que se possa transmitir corrente para o solo até a profundidade de investigação pretendida.

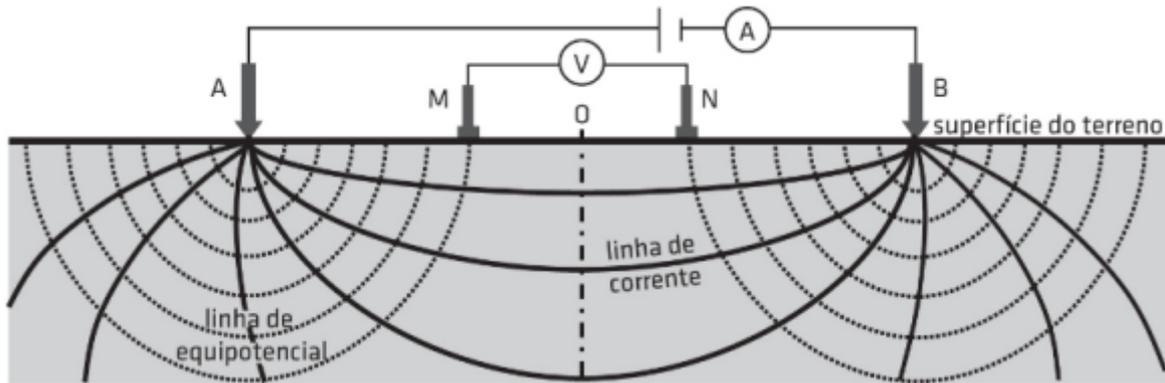


Figura 2.3: Configuração usualmente utilizada em campo na aquisição de dados elétricos, com injeção de corrente e medida de potencial. (Braga, 2006).

Quando consideramos um semi-espço homogêneo e isotrópico de condutividade  $\sigma$  que estabelece um fluxo de corrente contínua podemos calcular o potencial elétrico num meio homogêneo (Sato, 2002). Se  $dA$  é um elemento de área nesse semi-espço e  $\mathbf{J}$  densidade de corrente nesse elemento, temos que a corrente que passa em  $dA$  será  $\mathbf{J} \cdot dA$ .

Em condições estacionárias, a equação de Maxwell para o campo elétrico e a equação de conservação da carga elétrica se simplificam às equações abaixo:

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \quad (2.25)$$

$$\nabla \times \mathbf{J} = 0, \quad (2.26)$$

sendo  $\mathbf{E}$  a intensidade do campo elétrico ( $V/m$ ) e  $\mathbf{J}$  a densidade de corrente elétrica ( $A/m^2$ ). O campo elétrico ( $\mathbf{E}$ ) é um campo conservativo que pode ser derivado de um potencial elétrico  $V$ , da seguinte forma:

$$\mathbf{E} = -\nabla V. \quad (2.27)$$

Em meios isotrópicos e lineares a densidade de corrente elétrica se relaciona ao campo elétrico pela Lei de Ohm:

$$\mathbf{J} = \sigma \cdot \mathbf{E}, \quad (2.28)$$

na qual  $\sigma$  é a condutividade elétrica do semi-espaço. Quando utilizamos a Eq. 2.27 para substituir na Eq. 2.28, temos:

$$\mathbf{J} = -\sigma \cdot \nabla V. \quad (2.29)$$

Considerando a continuidade do fluxo de cargas no meio a divergência de  $\mathbf{J}$  será nula ( $\nabla \cdot \mathbf{J} = 0$ ). Sabendo disso e aplicando o divergente em ambos lados da Eq. 2.29, obtemos:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0. \quad (2.30)$$

Usando a identidade  $\nabla \cdot (\phi A) = \nabla \phi \cdot A + \phi \nabla \cdot A$  na Eq. 2.30, ela se resume a:

$$\nabla \sigma \cdot \nabla V + \sigma \nabla^2 V = 0. \quad (2.31)$$

Para um condutor homogêneo,  $\sigma$  é constante e diferente de zero, então o primeiro termo da Eq. 2.31 se anula restando a Equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0. \quad (2.32)$$

Quando olhamos para um eletrodo pontual de corrente no interior de um espaço condutor, homogêneo e isotrópico, haverá influência da simetria esférica e o potencial vai ser função da distância da fonte no ponto de medição. Porém no nosso caso temos que o eletrodo se encontra na superfície do semi-espaço como na Figura 2.2, na qual as linhas de campo elétrico são paralelas às linhas de fluxo de corrente e normal as superfícies equipotenciais, que tem forma hemisférica. Assim podemos obter para uma superfície hemisférica com raio  $r$  e área  $2\pi r^2$ :

$$\mathbf{E} = \frac{\rho I}{2\pi r^2}. \quad (2.33)$$

Sabendo da relação entre  $\mathbf{E}$  e  $V$  pela Eq. 2.27, por integração direta desta, desde a posição  $r$  até o infinito, onde o potencial é nulo, resulta que:

$$V = \frac{\rho I}{2\pi r}. \quad (2.34)$$

Sendo o terreno um semi-espaco uniforme, o campo elétrico ao redor de um eletrodo injetor de corrente no terreno é direcionado radialmente para fora, quando olhamos para o eletrodo receptor na qual o fluxo de corrente sai do terreno, as linhas de campo são direcionadas pra dentro (Figura 2.2b). O potencial em torno de uma fonte é positivo e diminui com a razão de  $1/r$  com o aumento da distância. O sinal da corrente  $I$  é negativo no receptor, onde a corrente flui para fora do terreno.

Ao termos a distância entre dois eletrodos de corrente finita (Figura 2.3), o potencial em qualquer ponto da superfície será afetado pelos dois eletrodos de corrente. Assim, o potencial devido ao eletrodo de corrente A no eletrodo M é:

$$V_1 = -\frac{A_1}{AM}. \quad (2.35)$$

Na qual  $A_1$  é:

$$A_1 = -\frac{I\rho}{2\pi}. \quad (2.36)$$

Agora, sabendo que as correntes nos dois eletrodos são iguais e opostas em direção, o potencial devido ao eletrodo de corrente B no eletrodo de potencial M é:

$$V_2 = -\frac{A_2}{BM}. \quad (2.37)$$

Sendo  $A_2$ :

$$A_2 = \frac{I\rho}{2\pi} = -A_1. \quad (2.38)$$

Temos que:

$$V_1 + V_2 = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right). \quad (2.39)$$

Por fim, quando se introduz um segundo eletrodo de potencial em N, é possível medir a diferença de potencial entre M e N, resultando em:

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi} \left[ \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) - \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \right]. \quad (2.40)$$

Essa disposição corresponde ao arranjo de quatro eletrodos, na qual  $\overline{AM}$ ,  $\overline{BM}$ ,  $\overline{AN}$ ,  $\overline{BN}$  são as distâncias entre os eletrodos. Ao isolar a resistividade, obtemos:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \left[ \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)} \right]. \quad (2.41)$$

Sendo o fator geométrico denominado por:

$$K = \frac{2\pi}{\left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN}\right)}. \quad (2.42)$$

Chegamos na seguinte equação:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}. \quad (2.43)$$

O fator geométrico tem dimensões de comprimento e depende somente da geometria relacionada aos eletrodos e como estão dispostos; sendo uma constante que a medida que aumenta a distância o potencial diminui. A Equação 2.43 rege o método da eletrorresistividade que baseia-se na injeção de corrente no solo por meio de eletrodos (A e B) e na medição da diferença de potencial resultante da corrente no solo nos outros dois eletrodos (M e N).

## Caminhamento Elétrico

Existem algumas técnicas de levantamento de Métodos Elétricos mas decreveremos apenas o Caminhamento Elétrico, pois foi a escolha aplicada nesta pesquisa.

Caminhamento Elétrico tem como objetivo gerar uma imagem 2D da subsuperfície que permita definir os limites da geometria das litologias da área estudada. É obtida com base em medidas efetuadas ao longo do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB. É possível investigar assim ao longo de linhas, as variações laterais do parâmetro físico em uma ou mais profundidades determinadas. Para realizar o caminhamento elétrico precisamos fixar o espaçamento entre os eletrodos para obtenção das leituras pertinentes a um mesmo nível. O arranjo mais utilizado nessa técnica é o dipolo-dipolo (Figura 2.4)

### 2.2.2 Inversão de dados de eletrorresistividade

A inversão geofísica pode ser definida como o processo matemático que determina um modelo idealizado de subsuperfície com base em um conjunto finito de dados observados, cuja resposta esteja em concordância com estes valores medidos (Gandolfo, 2007). As principais técnicas de inversão bidimensional para os dados de eletrorresistividade são as técnicas co-

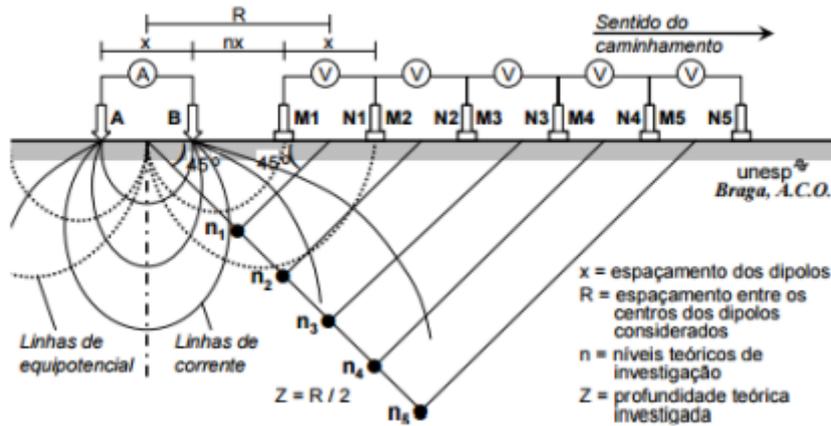


Figura 2.4: Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo dipolo-dipolo (Braga, 2006)

nhecidas como técnica de otimização através do método dos mínimos quadrados amortecidos e suavizados (Gonçalves, 2016).

No *software* utilizado, foi aplicado dois tipos principais de algoritmos de inversão: *Occam* e *Marquardt*. O primeiro é uma inversão de mínimos quadrados utilizando um operador de suavização e minimização de contraste adicional (Constable et al., 1987). Este algoritmo resulta em uma distribuição de parâmetro suavizada. A equação matricial para este tipo de inversão é a seguinte:

$$(A^T W^T W A + \mu C^T C) \Delta m = A^T W^T \Delta f - \mu C^T C m \quad (2.44)$$

O grau de suavidade do modelo resultante é diretamente proporcional ao valor do fator de Suavidade. Deve-se notar que valores muito grandes do parâmetro podem levar a *misfits* maiores.

A inversão *Marquardt* é um algoritmo clássico de inversão de mínimos quadrados com regularização de parâmetros de amortecimento (Marquardt, 1963). Se o meio for caracterizado por um pequeno número de parâmetros, esse algoritmo resulta em modelos de inversão com bordas mais definidas.

A equação matricial para este tipo de inversão é a seguinte:

$$(A^T W^T W A + \mu I) \Delta m = A^T W^T \Delta f \quad (2.45)$$

O uso desconsiderado desse tipo de inversão pode levar a resultados instáveis ou a um aumento no desvio padrão. É recomendado aplicar o algoritmo de *Marquardt* como um

método de refinamento (para reduzir o *misfit*) após executar a inversão com os algoritmos *Smoothness constrained* ou *Occam*.

## 2.3 Método VLF

O método VLF (*Very Low Frequency*) baseia-se na utilização de sinais de transmissores de rádio de uso militar, que possuem um alcance global e estão espalhados pelo mundo. Esse sinal é amplamente utilizado na comunicação naval, assim como em alguns serviços de comunicação marítima e militar (McNeill e Labson, 1988). O método opera na faixa de radiofrequência entre 3 e 30 kHz, mas, devido à limitação de potência dos transmissores utilizados, efetivamente atua entre 5 e 25 kHz (McNeill e Labson, 1988). Além disso, devido à sua capacidade de penetração de no mínimo 40 m sob a água, é empregado pelas Forças Armadas para a comunicação com submarinos.

Existem mais de quarenta desses transmissores (antenas) de comunicação global e uso militar (Figura 2.5), distribuídos pelo mundo, que podem ser utilizados para prospecção geofísica com receptores de equipamentos VLF. A faixa de frequência utilizada foi testada para a prospecção de corpos eletricamente condutivos em locais com depósitos minerais conhecidos desde 1963 (Saydam, 1981).

### 2.3.1 Princípios e Aplicações do VLF

As antenas transmissoras de ondas de radiofrequências VLF são monopolos elétricos verticais. Como resultado, as linhas de campo magnético se distribuem de forma concêntrica no plano horizontal ao redor do transmissor. No entanto, em áreas distantes da estação, as ondas de rádio podem ser tratadas como ondas planas, permanecendo assim desde que as condições geoeletricas do meio de propagação se mantenham estáveis (McNeill e Labson, 1988).

Os sinais VLF (*Very Low Frequency*) se propagam entre a ionosfera e a superfície da Terra (Figura 2.6), atuando como um guia de ondas, devido a isso, é crucial monitorar a ionosfera e sua altitude variável ao longo do dia, para que se evite ruídos nos dados. A modelagem teórica dessa propagação considera a curvatura da Terra, a ionosfera e sua altitude, além dos modos de propagação e a eficiência do transmissor. Na metodologia VLF, correntes induzidas em condutores geram campos secundários que, juntamente com o campo primário, resultam em variações na intensidade, direção e fase. Esse método geofísico mede essas variações para identificar condutores e suas características eletromagnéticas. Os transmissores e receptores VLF portáteis auxiliam na detecção de formações minerais ou anomalias eletro-

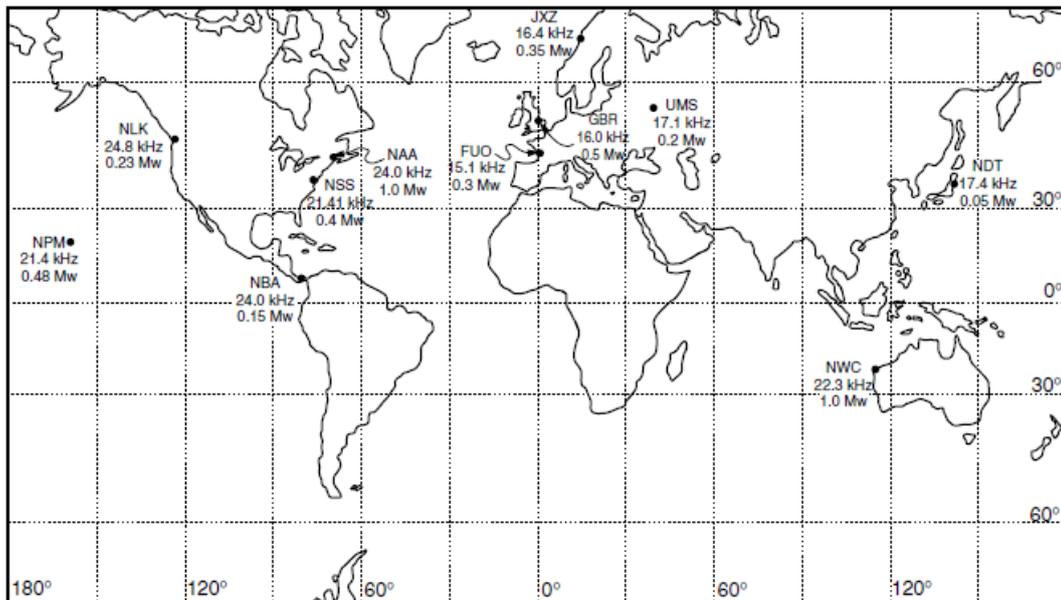


Figura 2.5: Principais transmissores VLF. Localização, códigos das estações (e.g. NAA), frequências em kHz e potência em MW.  
(Milsom e Eriksen, 2013).

magnéticas em subsuperfície, registrando componentes em fase e em quadratura do campo magnético vertical e horizontal.

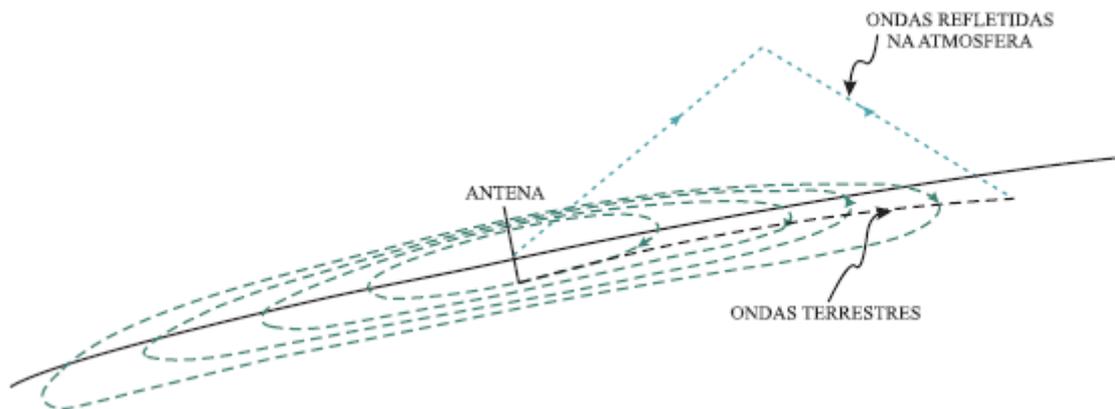


Figura 2.6: Campos eletromagnéticos gerados por um transmissor de ondas de rádio VLF e seu comportamento.  
(Conceição, 2010)

O método VLF (Very Low Frequency) baseia-se na medição da inclinação e intensidade dos componentes horizontal e vertical do campo magnético, revelando que o campo magnético atinge seu máximo sobre condutores em subsuperfície e o módulo vertical seu mínimo nessa mesma posição (Zhang, 2015). Esta técnica é eficaz para mapeamento geofísico e geolétrico, especialmente em regiões com alto contraste de condutividade elétrica, como zonas de falhas e corpos mineralizados. Além disso, o VLF é útil em várias aplicações, incluindo mapeamento

geológico, exploração de água subterrânea, geofísica ambiental, detecção de *overburden*, e identificação de tubulações metálicas e feições condutoras.

No que diz respeito à profundidade de investigação, no caso dos métodos eletromagnéticos, este parâmetro é controlado pela *skin depth* da onda plana, definida como a profundidade na qual a onda eletromagnética deve percorrer para sofrer uma atenuação de  $1/e$  (aproximadamente 37%) de sua intensidade (McNeill e Labson, 1988):

$$\delta = \sqrt{\frac{2\rho}{\omega\mu}}. \quad (2.46)$$

Essa equação também pode ser escrita da seguinte forma:

$$\delta = 503\sqrt{\frac{1}{f\sigma}}, \quad (2.47)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do meio e  $\mu = \mu_0\mu_r$  (Telford et al., 1990). Portanto, as expressões acima dependem das condições elétricas do terreno, bem como da frequência utilizada. De um modo geral, o *skin depth* para o VLF varia em torno entre 60 e 100 m de profundidade em solos altamente resistivos e entre 8 e 10 m em solos condutivos. O parâmetro de *skin depth* explicitado aqui é utilizado também na metodologia do GPR.

### 2.3.2 Modo de operação

O sistema VLF pode ser subdividido em dois distintos modos de operação:

- VLF-EM (Sistema VLF Eletromagnético);
- VLF-R (Sistema VLF Resistivo).

No presente trabalho, foi utilizado o VLF-EM. O modo de operação VLF-R pode ser consultado em McNeill e Labson (1988).

Para o modo VLF-EM ou modo *Tilt Angle* é necessário entender que a combinação dos campo VLF primário e secundário resulta em um campo elipticamente polarizado (Figura 2.7). Smith e Ward (1974) faz uma descrição dos parâmetros mais empregados no estudo da elipse de polarização empregada neste modo (Figura 2.7):

- *Tilt Angle*: ângulo espacial entre um dos eixos principais de uma elipse e um dos eixos coordenados, descrito por:

$$\theta = \pm 1/2 \arctan \left[ \frac{2(H_y/H_x)\cos\Delta\phi}{1 - (H_y/H_x)^2} \right]; \quad (2.48)$$

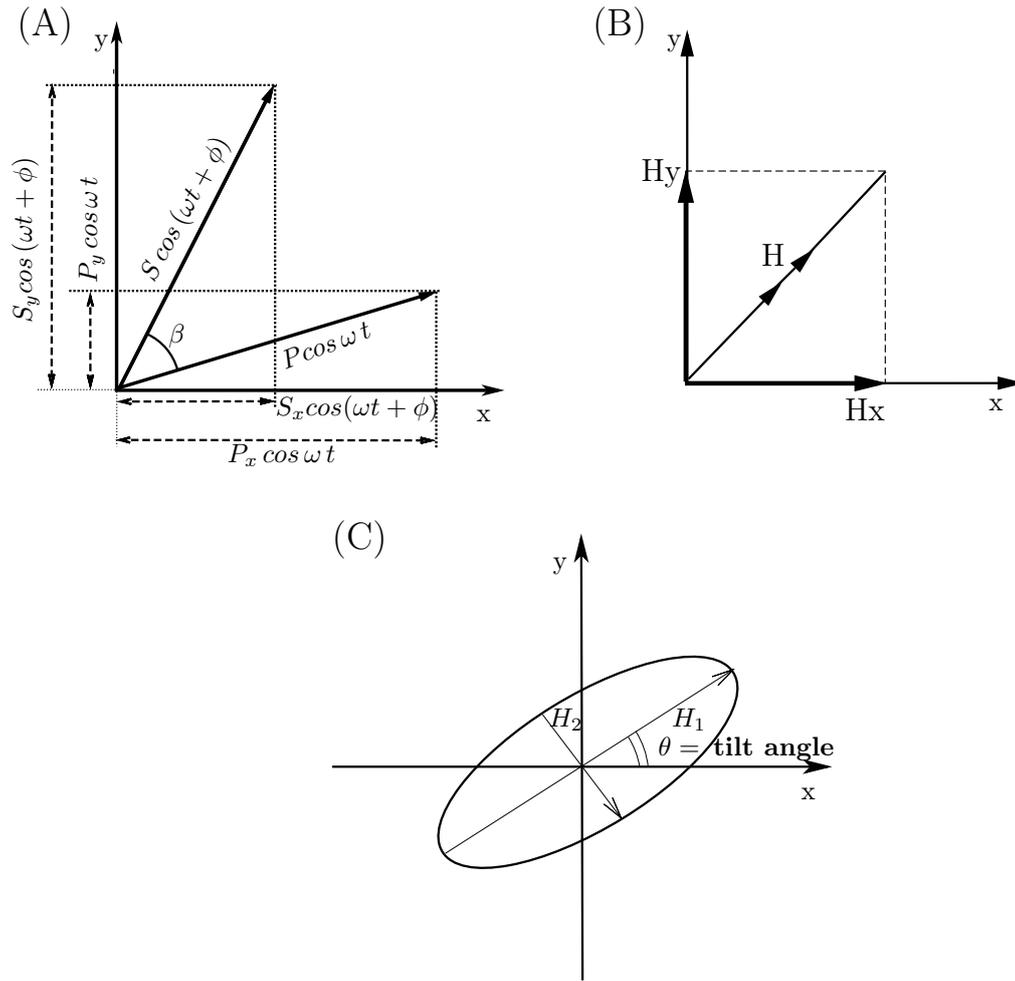


Figura 2.7: A projeção da elipse de polarização devido o campo magnético, o qual possui componentes  $H_z$  e  $H_x$ , pode ser entendido da seguinte forma: (A) Campo secundário orientado a um ângulo  $\beta$  no espaço, em relação ao campo primário. (B) As componentes vertical,  $R_y$ , e horizontal,  $R_x$ , da resultante do somatório dos vetores do campo primário e secundário. (C) A elipse de polarização inclinada a um *tilt angle*  $\theta$  em relação a horizontal.

Adaptado de Reynolds (2011).

- Elipsidade: razão entre a magnitude dos dois eixos principais dessa elipse, tal que:

$$\epsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{H_y H_x \sin(\Delta\phi)}{[H_y e^{i\Delta\phi} \sin\theta + H_x \cos\theta]^2}, \quad (2.49)$$

sendo o ângulo  $\Delta\phi$  a diferença de fase entres os campos magnéticos vertical e horizontal respectivamente de Amplitudes  $H_y$  e  $H_x$  e fases  $\phi_y$  e  $\phi_x$ , Portanto  $\Delta\phi = \phi_y - \phi_x$ .

Ao tomar o plano vertical que contém o maior eixo da elipse de polarização como referência, e utilizando as Equações 2.48 e 2.49 descritas nesta seção, podemos reescrevê-las de outra forma, considerando os termos da componente real  $\mathcal{R}(H_y)$  e imaginária  $\mathcal{I}(H_y)$  do

campo, em que:

$$\mathcal{R}(H_z) = \frac{H_y}{H_x} \cos \Delta\phi, \quad (2.50)$$

e

$$\mathcal{I}(H_z) = \frac{H_y}{H_x} \sin \Delta\phi, \quad (2.51)$$

então,

$$\theta = \pm 1/2 \arctan\left(\frac{2\mathcal{R}(H_y)}{1 - \left(\frac{H_y}{H_z}\right)^2}\right), \quad (2.52)$$

e

$$\epsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\mathcal{I}(H_y)}{[\mathcal{R}H_y + i\mathcal{I}(H_z)\sin\theta + \cos\theta]^2}, \quad (2.53)$$

ou ainda,

$$\epsilon = \frac{H_2}{H_1} = \frac{\mathcal{I}(H_y)}{[\mathcal{R}H_y \sin\theta + \cos\theta]^2 + [\mathcal{I}(H_z) \sin\theta]^2}. \quad (2.54)$$

As Equações 2.52 e 2.54 relacionam  $\theta$  e  $\epsilon$  com as componentes do campo vertical, multiplicadas pelo fator de correção, que dependem de  $H_y/H_x$  e  $\Delta\phi$ . Para intensidades relativamente pequenas do campo secundário, onde  $H_y \ll H_x$ , a equação 2.52 se reduz a:

$$\theta = \pm 1/2 \arctan[2\mathcal{R}(H_y)]. \quad (2.55)$$

Essa equação indica que a tangente, e portanto a inclinação, é aproximadamente proporcional à componente real do campo secundário, medida na direção vertical para ângulos pequenos. Nesse caso, a elipsidade pode ser expressa como

$$\epsilon = [\mathcal{I}(H_y)]. \quad (2.56)$$

Esta última equação demonstra uma proporção direta entre a elipsidade e a componente em quadratura do campo secundário vertical. A aproximação inerente a essas expressões resulta em erros quando se aplicam grandes campos secundários (Paterson e Ronka, 1971). Esses erros aumentam com a magnitude dos campos secundários, atingindo aproximadamente 10% para  $\frac{H_y}{H_x} = 0,5$ .

### 2.3.3 Características da Aquisição

Na presença de um condutor subterrâneo (como fraturas ou cavernas com água), um campo secundário é induzido nesse corpo condutor, e esse campo será sobreposto ao campo primário com uma fase diferente. Dessa forma, os campos primário e secundário serão medidos na superfície terrestre com um receptor VLF-EM. Devido à configuração de propagação das ondas, as medições de VLF devem ser realizadas em perfis com direção perpendicular às

estruturas geológicas-alvo, a fim de intensificar a influência do campo secundário medido. Além disso, o transmissor selecionado deve estar alinhado com as estruturas.

Na Figura 2.8, observa-se que a estrutura geológica está alinhada com a direção do campo elétrico emitido pela antena transmissora. Essa configuração resulta nas linhas do campo magnético primário atravessando ortogonalmente a feição geológica. Essas configurações

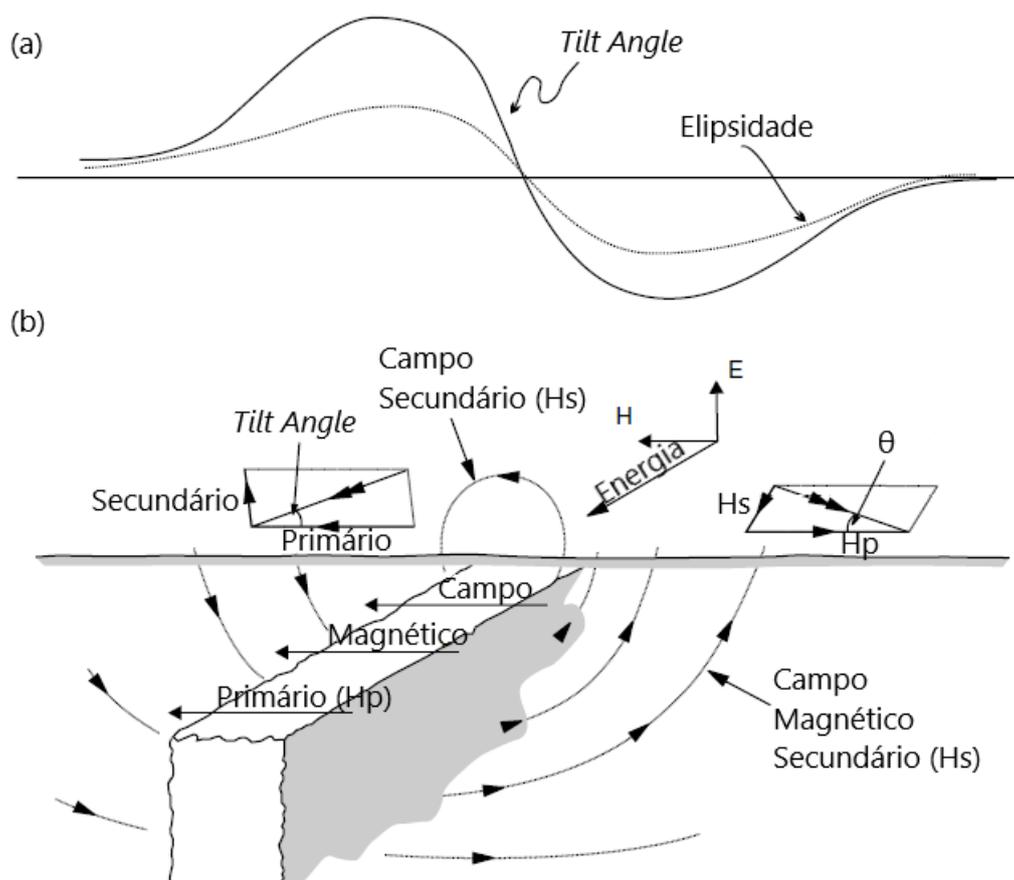


Figura 2.8: (a)Resposta do VLF-EM para o esquema de uma feição geológica condutora vertical e linear na direção do transmissor. (b) Esquema demonstrativo do princípio do sistema de prospecção VLF-EM para uma feição geológica condutora vertical e linear na direção do transmissor, com indicação dos campos primários e secundários.

Adaptado de Milsom e Eriksen (2013)

detalhadas estão diretamente relacionadas a um bom planejamento de campo para a execução do levantamento. É necessário escolher um transmissor com a distância ideal, que esteja em conformidade com o alvo geológico.

As antenas mais utilizadas no Brasil são as:

- Estação NAA Cutler, Maine, 24 kHz, 1000 kW;

- Estação NSS Anapolis, Maryland, 21,4 kHz, 400 kW;
- Estação NAU Porto Rico, 28,5 kHz, 100 kW e
- Estação GBR Rugby, England, 16 kHz, 750 kW.

Portanto, a escolha da antena receptora é um fator crucial para garantir que o campo eletromagnético primário seja suficientemente forte na área estudada. É importante destacar que, apesar do acoplamento perfeito entre transmissor, receptor e prospecto, a influência de ruídos antrópicos (como redes de transmissão elétrica), geomorfologia local adversa e condições ionosféricas desfavoráveis são aspectos que devem ser considerados no planejamento do levantamento de VLF em campo. Além disso, é necessário realizar uma verificação periódica do sinal da estação utilizada, uma vez que ele pode variar com a temperatura e também pode ser interrompido sem aviso prévio. Nas antenas transmissoras de frequências mais altas, ocorrem oscilações nas leituras; para obter um equilíbrio satisfatório e garantir a maioria dos tipos de medições, é recomendável manter o ganho do sinal no amplificador entre 30% e 100% (Conceição, 2010). Por fim, é interessante observar que, no hemisfério sul, embora a recepção seja adequada durante todo o dia, a qualidade da recepção do sinal de VLF é melhor no período da manhã.

### 2.3.4 Tratamento e Interpretação de Dados

Os dados VLF são tradicionalmente apresentados em formatos de curvas de *tilt angle* ( $\theta$ ) e elipsidade vertical ( $\epsilon$ ). No entanto, devido à presença de ruído, efeitos topográficos e condições geológicas complicadas, a interpretação dos dados VLF-EM pode ser desafiadora. Nesta pesquisa, aplicamos os métodos de filtragem de Fraser, Karous e Euler como metodologias interpretativas aos dados de VLF utilizados.

Fraser (1969) desenvolveu um filtro numérico simples, que consiste em subtrair a soma das observações de duas estações consecutivas da soma das observações entre duas estações consecutivas, empregando a expressão:

$$f_{2-3} = (M_3 + M_4) - (M_1 + M_2). \quad (2.57)$$

Na equação acima,  $M_1$  a  $M_4$  representam quatro pontos sucessivos no perfil, e o resultado é traçado entre os pontos  $M_2$  e  $M_3$ . O uso do filtro de Fraser aplicado aos dados de *tilt angle* (componente real) transforma o *crossover* da anomalia (o ponto onde o gráfico da anomalia intercepta o eixo  $x$ ) em um pico, gerando valores máximos com um pico positivo e indicando a presença de uma estrutura condutora (Sungkono et al., 2017). Esse processo de

filtragem ajusta os dados, tornando-os apropriados para a confecção de mapas de contorno e a delimitação de estruturas geológicas que produzem os sinais anômalos. No entanto, é importante destacar que o filtro pode deslocar levemente os picos da anomalia ao longo do perfil e alterar a resposta de estruturas complexas, o que pode levar a interpretações errôneas, uma vez que a resposta de um contato pode se assemelhar à de um corpo condutor. Portanto, é recomendável utilizar tanto os dados brutos quanto os filtrados no processo de interpretação (Farias, 1996).

Outra técnica de filtragem foi proposta por Karous e Hjelt (1983). O filtro representa uma extensão do Filtro Fraser, baseado na lei de Biot-Savart. Este filtro fornece o equivalente dos dados do componente real em termos de densidade de corrente elétrica aparente, em função da profundidade específica. A partir desses dados, é possível estabelecer a pseudoseção 2D da variação dessa densidade com a profundidade. Dessa forma, áreas de alta densidade de corrente correspondem a estruturas condutoras e vice-versa.

Por fim, aplicamos a Deconvolução de Euler (Thompson, 1982), que tradicionalmente é utilizada para estimar a profundidade de fontes magnéticas, mas que, neste trabalho, foi adaptada para definir o topo das fontes condutoras. Este método é empregado na estimativa da posição da fonte sem assumir informações sobre suas propriedades físicas (Pašteka e Kušnirák, 2020). A forma tridimensional da Deconvolução Clássica de Euler é dada por (Reid, FitzGerald e McInerny, 2003):

$$(x - x_0) \frac{\partial f}{\partial x} + (y - y_0) \frac{\partial f}{\partial y} + (z - z_0) \frac{\partial f}{\partial z} = \mathbf{N}(\mathbf{B} - \mathbf{f}), \quad (2.58)$$

onde  $x_0$ ,  $y_0$  e  $z_0$  indicam a posição de origem;  $f$  é o campo total (neste caso, a componente real após a aplicação do filtro Fraser);  $\mathbf{B}$  representa o valor do campo de background regional; e  $\mathbf{N}$  é o índice estrutural (SI), utilizado para descrever a geometria da fonte da anomalia. Este índice é definido como a variação na taxa do campo em função da distância (Reid, FitzGerald e McInerny, 2003; Thompson, 1982).

## 2.4 Método GPR

O método GPR (Ground Penetrating Radar) é uma técnica eletromagnética que utiliza ondas com frequências entre 10 MHz e 2,5 GHz para identificar objetos ou estruturas enterradas e interfaces geológicas, baseando-se na variação da permissividade dielétrica do meio. Destaca-se por seus equipamentos leves e portáteis, permitindo a cobertura rápida de grandes áreas e proporcionando resultados nítidos. O funcionamento envolve a emissão de pulsos de energia eletromagnética pelo gerador, capturados pela antena receptora após refletirem e refratarem

Frequência em MegaHertz (MHz)	Profundidade de penetração aproximada em metros (m)	Aplicações
2600 MHz	0-0,3 m	Inspeção em cimento
1600 MHz	0-0,5 m	Inspeção em cimento
900 MHz	0-1 m	Inspeção em cimento e identificação de vazios
400 MHz	0-4 m	Meio Ambiente, Engenharia e Identificação de vazios
200 MHz	0-9 m	Geologia, Engenharia, Meio Ambiente, Mineração e Arqueologia
100 MHz	0-15 m	Geologia, Meio Ambiente, Mineração e Arqueologia

Tabela 2.1: Tabela de Frequência e Aplicações do GPR (GSSI Geophysical Survey Systems, Inc, 2024)

em descontinuidades geológicas ou objetos enterrados, resultando em um gráfico de distância versus tempo no monitor do GPR.

### 2.4.1 Tipos de Antena

O equipamento pode operar em diferentes faixas de frequência, cuja escolha depende do objetivo e do alvo a ser detectado. Frequências altas oferecem alta resolução, mas têm menor alcance e são ideais para estruturas de construção civil. Frequências baixas, por outro lado, permitem investigar profundidades maiores, mas com menor resolução (Tabela 2.1). Antenas blindadas evitam a detecção de ondas diretas do ar e são de alta frequência, enquanto antenas não blindadas, que são mais antigas, operam em frequências mais baixas. Existem também antenas blindadas multifrequenciais e antenas multicanais, que permitem a realização de vários perfis simultaneamente.

### 2.4.2 Propriedade Dielétrica

A constante dielétrica relativa e a condutividade elétrica são as principais propriedades que governam o comportamento das ondas de radar em subsuperfície, sendo a condutividade elétrica a principal responsável pela atenuação do sinal eletromagnético. A constante dielétrica relativa ( $\epsilon_r$ ) pode variar de 1 (ar) até 81 (água). No entanto, para a maioria dos materiais geológicos, essa constante varia de 3 a 30. Dessa forma, o intervalo de velocidade das ondas

de radar é grande, variando de 0,06 a 0,175 m/ns, enquanto a onda eletromagnética viaja a 0,30 m/ns no ar. A Figura 2.9 ilustra a variação da velocidade da onda de radar em função da constante dielétrica relativa.

A Tabela 2.2 lista os valores da constante dielétrica relativa e da velocidade da onda eletromagnética para uma grande quantidade de materiais geológicos e artificiais.

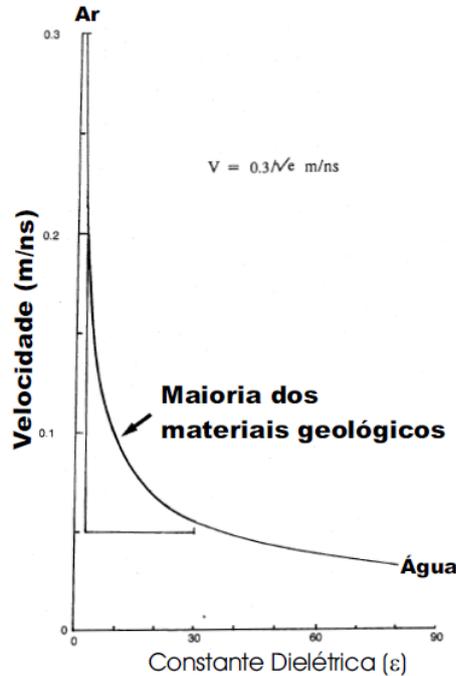


Figura 2.9: Velocidade das ondas de radar em função da constante dielétrica relativa (Reynolds, 2011)

A profundidade de alcance da onda, além de depender da frequência, também é influenciada pelas propriedades elétricas do meio. O GPR (Ground Penetrating Radar) atua no contraste dessas propriedades. A permissividade dielétrica (ou constante dielétrica) está associada à corrente de deslocamento e à polarização (**D**). A constante dielétrica ( $\epsilon$ ) é, portanto, a constante de proporcionalidade entre o campo elétrico (**E**) e a polarização (**D**). A permissividade elétrica é crucial, pois afeta diretamente a propagação das ondas de radar. Além disso, a permissividade relativa é importante para calcular a velocidade da onda eletromagnética no meio, utilizando a seguinte expressão simplificada:

$$V_{em} = \frac{c}{\sqrt{\epsilon'_r}}, \quad (2.59)$$

sendo que  $\epsilon'_r$  (permissividade relativa) ou  $k$  (constante dielétrica dos materiais) e:

$$\epsilon'_r = \frac{\epsilon}{\epsilon_0} = k, \quad (2.60)$$

no qual  $\varepsilon$  é a permissividade dielétrica do material e  $\varepsilon_0 = 8,854 \times 10^{-12}$  F/m permissividade dielétrica no vácuo.

Por meio dessas equações, é possível estimar as velocidades para cada tipo de meio e determinar qual meio permite que a onda se propague mais rapidamente. O ar possui uma constante dielétrica  $k$  baixa, o que indica uma velocidade elevada para a onda. A Tabela 2.2 abaixo apresenta os valores de permissividade elétrica para alguns meios. No entanto, dependendo do ambiente, essa propriedade física pode variar significativamente, tornando às vezes difícil identificar um valor preciso de permissividade dielétrica para um material específico.

A constante dielétrica relativa  $\varepsilon_r$  de materiais geológicos também pode ser expressa em termos da porosidade da rocha  $\phi$ , considerando a proporção dos minerais e elementos presentes e suas respectivas constantes dielétricas relativas. Reynolds (2011) apresentou a seguinte relação entre  $\varepsilon_r$  e  $\phi$ :

$$\varepsilon_r = (1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w, \quad (2.61)$$

onde  $\phi$  é a porosidade,  $\varepsilon_m$  e  $\varepsilon_w$  são as constantes dielétricas relativas da matriz da rocha e do fluido que a satura, respectivamente. Para que essa relação faça sentido, um campo externo deve ser aplicado paralelamente ao acamamento da rocha.

Quando um campo externo é aplicado perpendicular às camadas de rocha, tem-se que:

$$\varepsilon_r = \frac{\varepsilon_m \varepsilon_w}{(1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w}. \quad (2.62)$$

Usando a relação simplificada na qual  $v = c/\sqrt{\varepsilon_r}$ , para materiais com baixa perda, sendo  $c$  é a velocidade da luz no ar, e substituindo na equação 2.61 para  $\varepsilon_r$  tem-se:

$$v = \frac{c}{[(1 - \phi)\varepsilon_m + \phi\varepsilon_w]^{1/2}}. \quad (2.63)$$

Logo, se conhecermos a constante dielétrica relativa de cada constituinte da rocha e se o seu volume foi medido ou derivado a partir da velocidade da onda, podemos calcular a porosidade total.

### 2.4.3 Técnicas de aquisição de dados

Existem quatro técnicas principais de aquisição de dados de GPR: perfis de afastamento comum; reflexão e refração de grande abertura angular (*Wide Aperture Reflection or Refraction*, ou WARR); ponto médio comum (*Common Mid Point*, ou CMP); e transiluminação ou tomografia de radar.

Materiais	Constante dielétrica $\epsilon'_r$	Velocidade da Onda eletromagnética ( $m/ns$ )
Ar	1	0,3
Água (doce)	81	0,033
Água (mar)	81	0,033
Água destilada	80	0,033
Sal	5-6	0,13
Neve polar	1,4-3	0,194-0,252
Gelo polar	3-3,15	0,168
Gelo temperado	3,2	0,167
Gelo puro	3,2	0,167
Gelo do mar	2,5-8	78-157
Permafrost	1-8	0,106-0,3
Areia litoral (seca)	10	0,095
Areia (seca)	3-6	0,12-0,17
Areia (saturada)	25-30	0,055-0,06
Silte (saturado)	10	0,095
Argila (saturada)	8-15	0,086-0,11
Solo argiloso (seco)	3	0,173
Pântano	12	0,086
Solo comum	16	0,075
Granito	5-8	0,106-0,12
Dolomita	6,8-8	0,106-0,115
Basalto (molhado)	8	0,106
Xisto (saturado)	7	0,113
Arenito (saturado)	6	0,112
Calcário	4-8	0,12
Carvão	4-5	0,134-0,15
Quartzo	4,3	0,145
Folhelho	5-15	0,09
Silte	5-30	0,07
Folhelho saturado	7	0,043
Concreto	6-30	0,055-0,112
Asfalto	3-5	0,134-0,173
PVC, Epoxy, Polyesters	3	173

Tabela 2.2: Constantes dielétricas relativas e velocidade das ondas para alguns materiais geológicos e artificiais.

Adaptado de Davis e Annan (1989) e Reynolds (2011).

### Perfil de Afastamento Comum ou Constante

Nessa técnica, as antenas transmissora e receptora são mantidas a uma separação fixa, e deslocadas ao longo do perfil. O eixo vertical representa o tempo de viagem das ondas refletidas e o eixo horizontal, a distância. A separação pequena das antenas permite considerar as seções como *zero-offset*, mas se for grande, deve ser considerada no processamento dos dados. A Figura 2.10 A ilustra esta técnica.

### Perfil CMP

Aqui, as antenas são afastadas em sentidos opostos na direção do perfil, mantendo o ponto médio fixo (Figura 2.10 B). Isso permite a emissão de vários pulsos no mesmo local, aumentando a precisão do método.

### Perfil WARR

Nesta técnica, uma antena permanece fixa e a outra é afastada lateralmente na direção do perfil (Figura 2.10 C). É adequada para áreas com refletores plano-paralelos ou pouco inclinados, o que não se aplica a muitos casos.

### Transiluminação ou Tomografia

As antenas são posicionadas em lados opostos do meio a ser investigado, como poços verticais contíguos (Figura 2.10 D). Exemplos comuns incluem inspeção de colunas de concreto e tomografias subterrâneas.

## 2.4.4 Etapas do processamento

Foi utilizado um fluxograma de processamento básico com cinco etapas: correção estática (ajuste do tempo zero), remoção do fundo em 2D, filtro passa-faixa em 1D, aplicação de ganho e análise de velocidade (Silva, 2019). A qualidade dos dados brutos é frequentemente insuficiente devido a ruídos e perdas de energia, o que afeta a interpretação da seção de radar. A visualização inicial da seção de radar permite uma análise preliminar dos dados para definir as etapas de processamento.

- **Correção Estática (Redução ao Tempo Zero):** Ajusta o deslocamento do tempo zero para reposicionar os refletores corretamente e corrigir erros causados por desalinhamentos e saltos do equipamento.

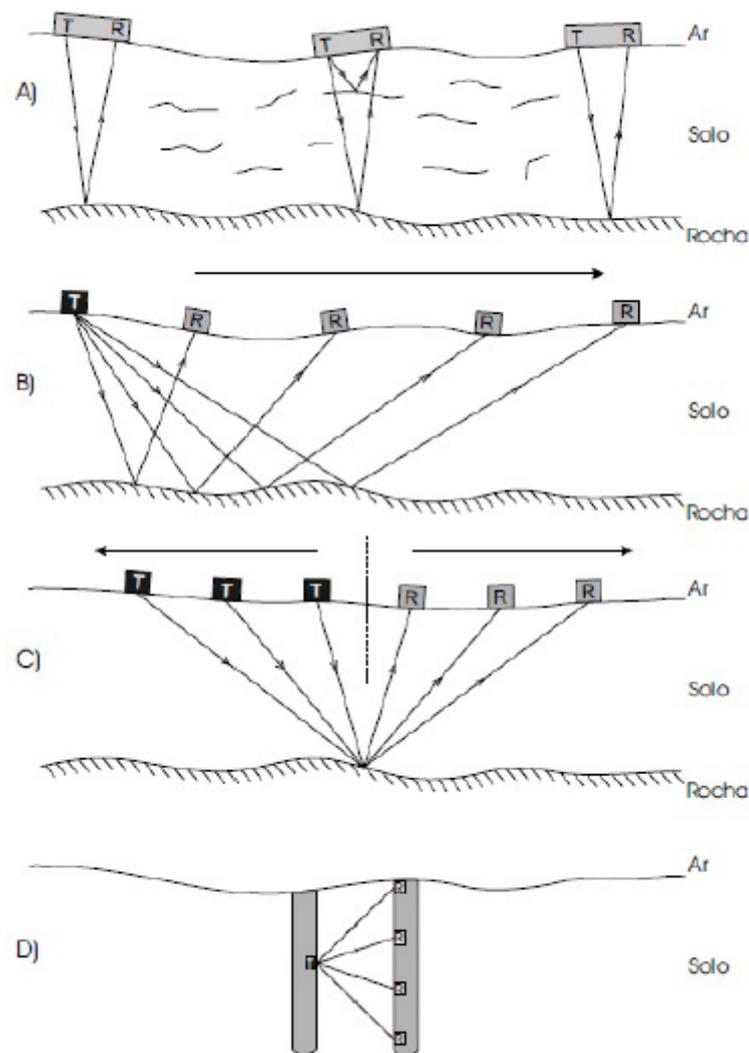


Figura 2.10: Principais técnicas de aquisição de dados de GPR. A) Afastamento constante; B) WARR; C) CMP; D) Transiluminação ou tomografia. (Pinto, 2007)

- **Filtro Dewow:** Remove o ruído WOW, um componente transiente de baixa frequência, utilizando um filtro passa-baixa. Atua em cada traço individualmente para minimizar a saturação e melhorar a visualização dos dados.
- **Remoção de *Background*:** Corrige a contaminação dos dados nos tempos iniciais devido à indução eletromagnética, utilizando o filtro de remoção do *background* para melhorar a visualização das ondas refletidas em subsuperfície.
- **Filtro Passa-Banda de Frequência (*bandpass frequency*):** Filtra ruídos incoerentes ajustando as faixas de frequência para melhorar a razão sinal/ruído. A faixa é determinada por valores de frequência formando vértices de um trapézio. O filtro

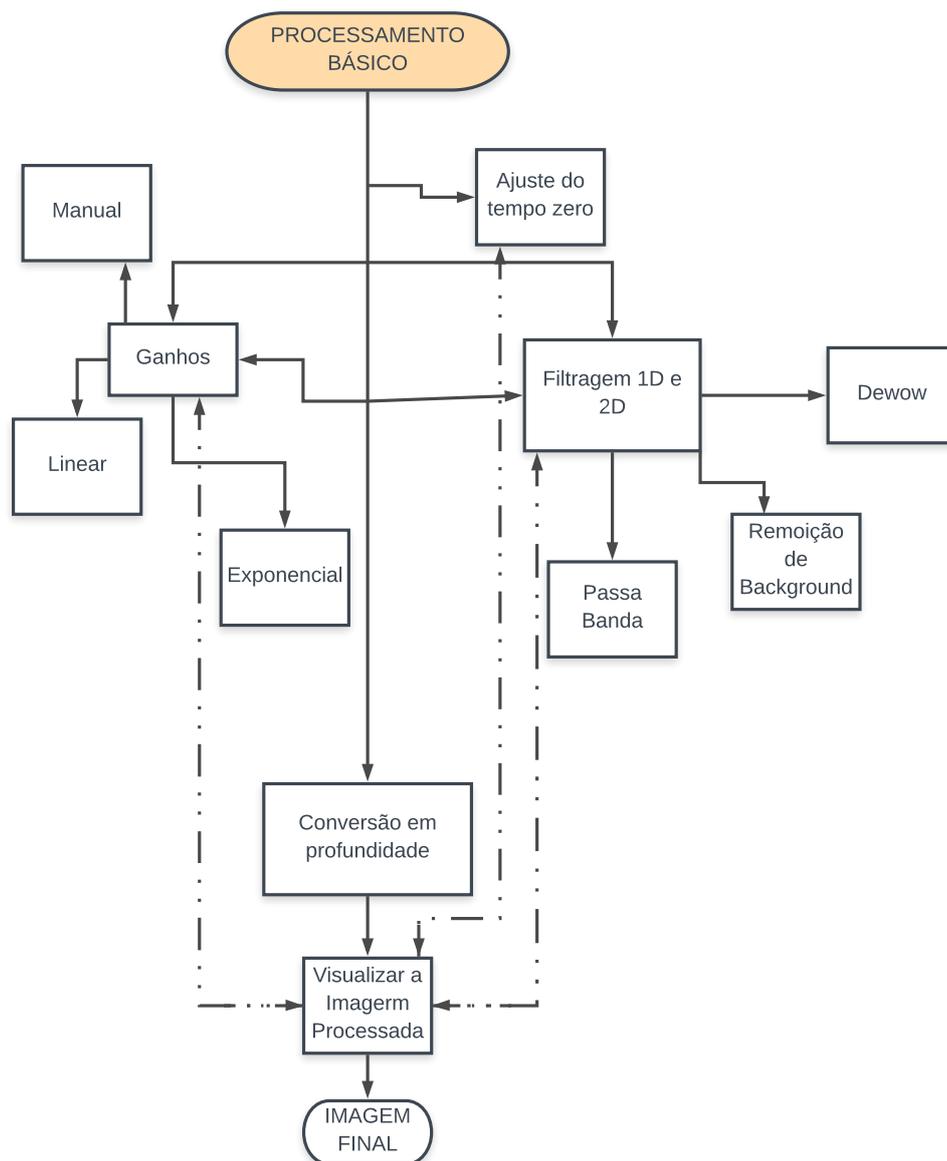


Figura 2.11: Fluxograma do processamento básico de GPR

não é ideal e possui uma região de roll-off onde as frequências são atenuadas, mas não rejeitadas completamente.

- **Aplicação de Ganho:** Utiliza a *Gain function* e o AGC. A *Gain function* ajusta os dados com uma função  $g(t)$  que inclui termos lineares e exponenciais. O AGC equaliza as amplitudes dentro de uma janela temporal, com um *scaling factor* para compensar perdas e a opção *normalize* para enfatizar faixas de baixa amplitude.
- **Conversão Tempo-Profundidade/Análise de Velocidade:** Utiliza valores de velocidade da Tabela 2.2 ou análise de hipérbolas ajustadas para realizar uma migração

*timedepthconversion*, convertendo a escala vertical do radargrama de tempo para profundidade.

No trabalho também foi utilizado atributos através da utilização dos pacotes *bruges* e *ndimage* na linguagem de programação *Python*, foram utilizados os atributos que pragamáticamente fossem úteis na contribuição de informações sobre as zonas e regiões estudadas. Os atributos utilizados foram envelope, fase instantânea e frequência instantânea. O atributo envelope é derivado da amplitude da onda independentemente da polaridade ou fase do sinal o que o torna diretamente proporcional é um parâmetro geofísico derivado da análise do traço complexo, utilizado para mapear a continuidade dos refletores, por fim a frequência instantânea é a derivada da fase e também é utilizado para delimitar descontinuidades verticais e laterais.

# 3

## Procedimentos para Coleta e Análise dos Dados

Neste capítulo, abordaremos as etapas fundamentais da pesquisa, incluindo a aquisição, o processamento e a análise dos resultados. As etapas serão discutidas de acordo com as áreas de estudo abordadas. Inicialmente, descreveremos os procedimentos e técnicas utilizados na coleta de dados, seguidos pela metodologia empregada no processamento das informações obtidas. Por fim, apresentaremos e discutiremos os resultados, destacando suas implicações e relevância para o estudo em questão. Este capítulo oferece uma visão integrada do processo, desde a obtenção dos dados até a interpretação final, permitindo uma compreensão abrangente dos achados desta pesquisa.

### 3.1 Aquisição, Processamento e Interpretação dos Dados do Aterro Sanitário de Camaçari

A Figura 3.1 apresenta um mapa detalhado que ilustra a localização da área de estudo, juntamente com os perfis geofísicos numerados 1 (AA'), 2 (BB') e 3 (CC'). Esses perfis foram cuidadosamente medidos utilizando três métodos distintos: Eletrorresistividade (ER), Very Low Frequency (VLF) e Ground Penetrating Radar (GPR). Cada um desses métodos contribui para uma análise abrangente das características do Aterro de Camaçari.

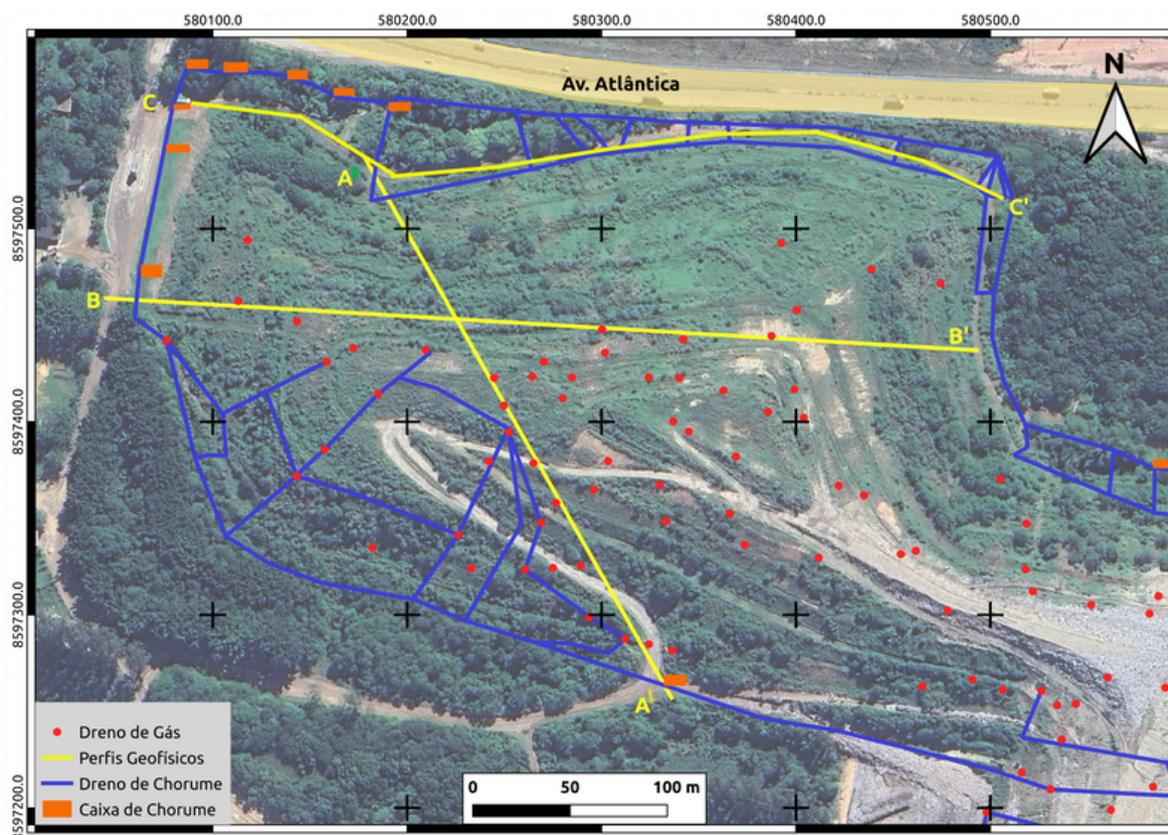


Figura 3.1: Mapa de localização do Aterro de Camaçari mostrando os perfis geofísicos e outras feições do aterro.

### 3.1.1 Aquisição dos Dados

Para a aquisição dos dados de eletroresistividade (ER), utilizou-se um eletrorresistímetro da marca Iris Instruments (Figura 3.2a). Para determinar os valores de resistividade aparente, foram empregados quatro eletrodos dispostos geometricamente em arranjo do tipo Dipolo-Dipolo. Os dados de ER foram coletados durante quatro campanhas, com o planejamento realizado de forma a obter linhas longitudinais e transversais ao maior comprimento do aterro. Foram executados dois perfis de eletroresistividade (ER) para a caracterização geométrica e a avaliação da dinâmica dos percolados do aterro sanitário: um perfil transversal (Perfil 1) e um perfil longitudinal (Perfil 2). O perfil longitudinal foi obtido com espaçamento de 20 metros entre os eletrodos, enquanto o perfil transversal teve um espaçamento de 30 metros.

Os dados VLF-EM deste estudo foram adquiridos ao longo dos Perfis 1, 2 e 3 (Figura 3.1), coincidindo com os perfis de aquisição de ER e, posteriormente, com o perfil de GPR. As leituras foram realizadas em intervalos de aproximadamente 10 m ao longo desses perfis, utilizando um GPS de mão e uma unidade T-VLF da IRIS Instruments, modelo 1993 (IRIS Instruments, Orléans, França), operando nas frequências de 16 e 24kHz (Figura 3.2b).

O levantamento foi conduzido em campo no modo VLF-EM e ocorreu ao longo de dois dias. Destaca-se também que o perfil 01 apresentava orientação quase norte-sul (paralela ao Aterro Sanitário), enquanto os perfis 02 e 03 foram orientados na direção nordeste-sudoeste (transversal ao Aterro Sanitário).

O equipamento utilizado para realizar o levantamento de dados de GPR possui uma fonte que emite um pulso de energia eletromagnética diretamente no solo por meio de uma antena transmissora, e uma antena receptora que captura o pulso refletido e refratado pelas discontinuidades geológicas e objetos enterrados. O equipamento foi deslocado ao longo da direção do Perfil 3 (ver Figura 3.1), e as respostas foram adquiridas e exibidas no monitor da unidade de controle do GPR. Assim como na sísmica de reflexão, a resposta obtida pelo método de GPR gera um gráfico de distância versus tempo, no qual o sinal refletido é detectado em função do tempo de trânsito duplo. Estes dados de GPR foram coletados utilizando uma antena de 200 MHz e a unidade de controle SIR20 da *GSSI Geophysical Survey Systems, Inc.* O Perfil 3 foi dividido em 8 perfis menores ao redor de uma estaca lateral do aterro (Figura 3.1), cobrindo uma das laterais deste empreendimento. A segmentação do Perfil 3 em perfis menores foi necessária devido ao comprimento limitado do cabo disponível para o equipamento utilizado e à falta de mobilidade da unidade de controle, sendo que cada perfil menor possui entre 14 e 60 metros.

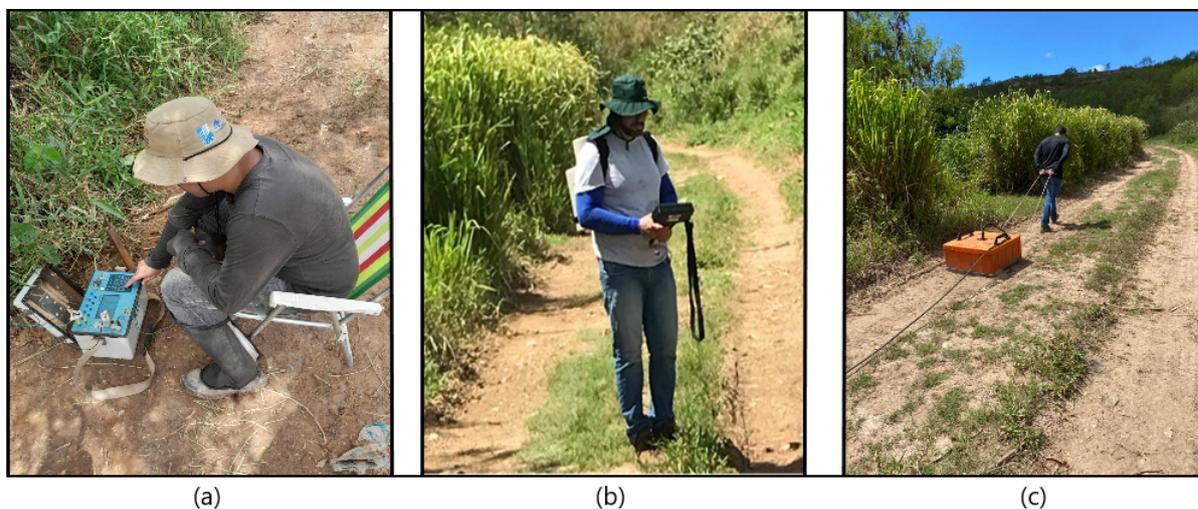


Figura 3.2: Imagens do levantamento de dados de (a) ER, (b) VLF e (c) GPR.

### 3.1.2 Processamento e Interpretação dos Resultados

Além de mostrar a disposição dos perfis coletados, a Figura 3.1 permite a visualização da localização do sistema de coleta e transporte de chorume e dos drenos de gás do aterro

sanitário em estudo. Processamos e interpretamos os dados geofísicos, resultando em pseudosseções e perfis que foram analisados tanto individualmente para cada método quanto de forma conjunta.

### Processamento e Interpretação dos dados de ER

Nos Perfis 01 e 02, aplicou-se a suavização com a Norma L2 e a inversão suavizada de Occam com 15 iterações, resultando em um RMS final de 4,73 e 5,36, respectivamente. A solução do problema não linear foi obtida no espaço dos parâmetros do modelo, usando uma variante do Método de Newton (COSTA, 2006). Os dados de eletrorresistividade foram processados com o software *Zond*. Os dados de resistividade são apresentados nas Figuras 3.3 e 3.4, em três seções: a) pseudosseção dos dados de resistividade aparente, b) dados calculados a partir das resistividades aparente resultantes da inversão, e c) seção de resistividades verdadeiras para interpretação. O ajuste entre os dados medidos e calculados é avaliado pelo erro quadrático médio (RMS), que indica a coerência do modelo. No entanto, um RMS baixo não garante um modelo geológico ou geotécnico coerente, sendo essencial um conhecimento prévio da área.

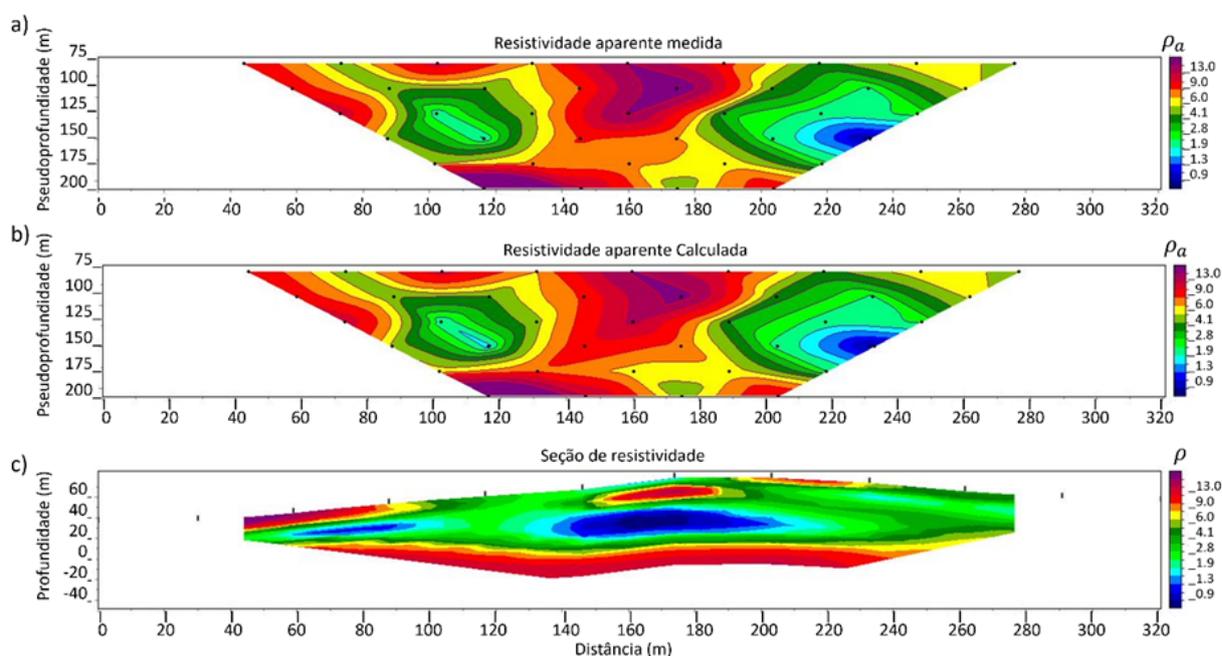


Figura 3.3: Perfil 01 transversal de Eletrorresistividade, com a pseudosseção de resistividade aparente e calculada e a seção de resistividade com a topografia.

Na seção de resistividade verdadeira do Perfil 01 (Figura 3.3c), identifica-se uma camada com resistividade entre 7 e 14,  $\Omega \cdot m$  na parte inferior de todo o perfil, indicando a base

do aterro entre 35 e 25 metros de profundidade em relação à superfície do terreno. Esta interpretação é plausível, pois a argila compactada é utilizada no fundo da cava como parte do processo construtivo, visando à impermeabilização e à proteção de camadas adjacentes contra contaminações.

A movimentação ascendente do gás ocorre devido à decomposição contínua da matéria orgânica em profundidade dentro da cava, criando um ambiente confinado no qual a pressão interna aumenta, tornando-se maior que a pressão atmosférica e gerando um gradiente de pressão. Como indicativo da presença de um bolsão de biogás, observa-se que entre 140 e 200 metros, na parte superior da seção eletroressistiva, observa-se uma anomalia com resistividade em torno de  $15\Omega \cdot m$ . Imagina-se que camadas superficiais impermeáveis e/ou geomembranas aprisionam o gás, levando à formação do bolsão. Esse comportamento físico é previsto e considerado na disposição dos drenos, localizados próximos ao Perfil 01 (Figura 3.1). Na porção mais profunda desse perfil, as anomalias condutivas, com resistividade entre  $1,8$  e  $0,9\Omega \cdot m$ , corroboram o processo da dinâmica dos fluidos líquidos naturalmente presentes neste aterro sanitário. Neste caso, o chorume, mais denso, desce para a base da cava e é direcionado para os drenos de chorume (e posteriormente para a central de tratamento).

Na seção de resistividade verdadeira do Perfil 02 (Figura 3.4c), observa-se uma feição geolétrica com resistividade variando de  $15$  a  $46\Omega \cdot m$ , indicativa da presença de argila compactada utilizada para a impermeabilização do aterro. Esta feição é encontrada na porção mais profunda, entre as posições de  $30$  a  $170m$  deste perfil. Notavelmente, essa camada não apresenta continuidade, em contraste com o Perfil 01. Além disso, os valores mais elevados de resistividade sugerem a influência da rocha da fundação do aterro. A menor profundidade da rocha do embasamento justifica a assimetria no fundo da cava, que se encontra a aproximadamente  $25$  metros apenas no início do Perfil 02, correspondendo à profundidade encontrada no Perfil 01. A descontinuidade da resistividade na parte profunda do perfil, marcada pela presença de uma feição condutiva com resistividade variando entre  $1,8$  e  $0,8\Omega \cdot m$  na distância de  $160$  metros, pode corresponder à presença de chorume nessa profundidade. Duas interpretações são possíveis: a cava pode se tornar mais profunda, ou o fundo da cava pode estar contaminado com chorume, indicando um possível vazamento na camada impermeabilizante.

No Perfil 2 (Figura 3.4), é possível identificar feições resistivas circulares com resistividade variando entre  $15$  e  $30\Omega \cdot m$ , indicando a presença de vários bolsões de gás que, devido ao processo de formação, tornou-se mais denso. Isso sugere, provavelmente, a presença de diferentes tipos de lixo ou disposições de lixo em tempos distintos, com um processo de decomposição mais avançado do que em outras áreas do aterro. As localizações dos bolsões

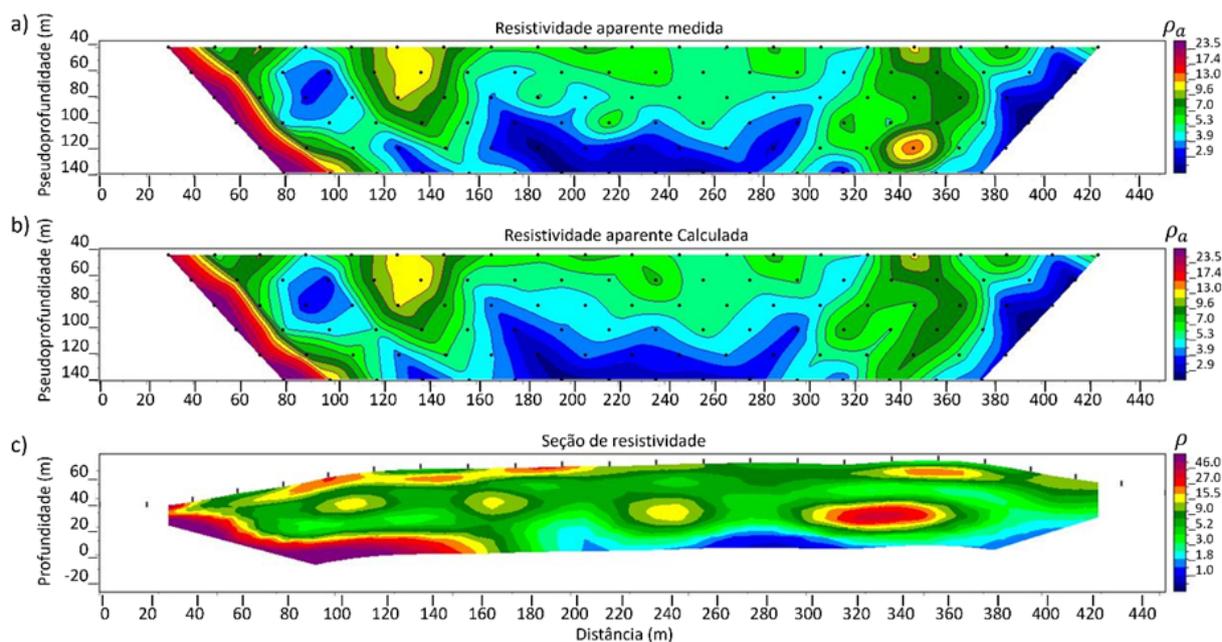


Figura 3.4: Perfil 02 longitudinal de Eletroresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparente e calculada e a seção de resistividade com a topografia.

de gás coincidem com alguns drenos de gás, estando eles aprisionados por uma membrana impermeabilizante. Novamente, neste perfil, é possível observar a dinâmica dos fluidos no interior do aterro por meio dos fluxos que podem ser inferidos a partir das informações extraídas dos dados de resistividade.

### Processamento e Interpretação dos dados de VLF

Para interpretar qualitativa e quantitativamente os dados de VLF, foram utilizados o Filtro Fraser (Fraser, 1969) e o Filtro Karous-Hjelt (Karous e Hjelt, 1983) para gerar curvas e pseudoseções da densidade de corrente. Uma interpretação quantitativa adicional foi realizada com a técnica de Deconvolução de Euler (Thompson, 1982), aplicada às derivadas verticais e horizontais dos dados obtidos com o Filtro Fraser. A técnica de deconvolução utilizada ajuda a identificar e caracterizar estruturas geológicas por meio de índices estruturais, que, para esta pesquisa, foram assumidos com o valor 1.

Os gráficos apresentados nas Figuras A.1, A.2 e A.3 do Apêndice A mostram os valores dos dados brutos de *Tilt Angle* e Elipsidade coletados nos Perfis 01, 02 e 03. Em um terreno homogêneo, o *Tilt Angle* do eixo maior da elipse de polarização é zero. À medida que o perfil se aproxima de um corpo condutor, o eixo maior da elipse se inclina até atingir um valor máximo. Após esse ponto, a inclinação do eixo começa a diminuir, passando por zero, o

que indica a localização do centro do corpo condutor quando o perfil o atravessa. À medida que o perfil se afasta do corpo condutor, o eixo da elipse continua a se inclinar, assumindo valores negativos até alcançar um valor mínimo, podendo então retornar ao valor zero.

A interpretação dos registros de medição do Perfil 01, transversal ao aterro sanitário estudado, é apresentada nas Figuras 3.5a, 3.5b e 3.5c. Na Figura 3.5a, além dos dados do *Tilt Angle* e do filtro Fraser, a Deconvolução de Euler estima profundidades das fontes condutoras. A Figura 3.5b exibe a pseudoseção da densidade de corrente. A curva de *Tilt Angle* sugere uma condutividade com pouca variação lateral, enquanto os picos no filtro Fraser, localizados entre 100 e 150 m, entre 300 e 350 m, e após 350 m, indicam material condutor em subsuperfície, que de acordo com os resultados de profundidade Euler foram estimadas com profundidades de 30, 12 e 8 m, respectivamente. A densidade de corrente intensa entre 100 e 150 m, e outra de menor intensidade após 300 m, com profundidades de 25 m e 10, m, respectivamente, obtidas pelo método Karous-Hjelt (Figura 3.5b), corroboram os dados do perfil VLF e a interpretação geoeétrica.

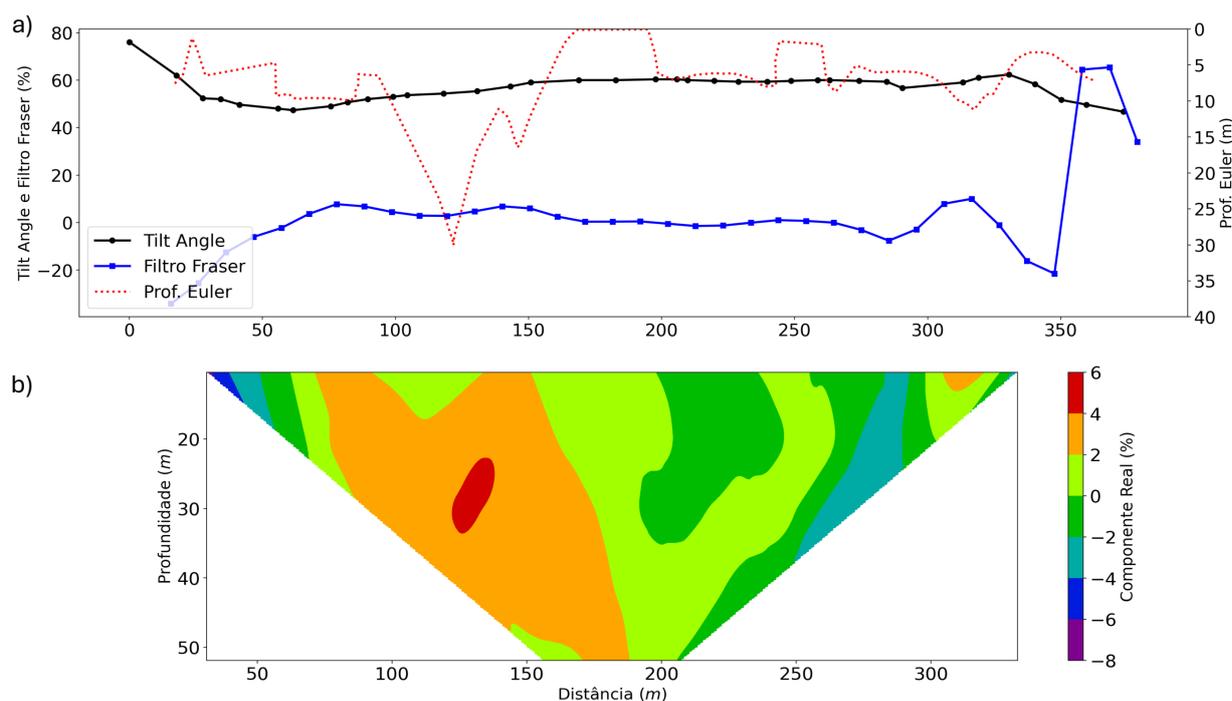


Figura 3.5: Perfil 01 lateral de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 01 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos (*Tilt*), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjelt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto.

A interpretação dos dados do Perfil 02, alinhado ao aterro sanitário em estudo, é apresentada na Figura 3.6. Na Figura 3.6a, são mostradas as variações dos dados de *Tilt Angle*,

os dados obtidos pelo filtro Fraser e a estimativa de profundidade das fontes condutoras obtida pela Deconvolução de Euler. A análise do *Tilt Angle* indica um condutor forte na parte central, enquanto os dados do Fraser revelam picos positivos em torno de 200 e 400 m, com profundidades estimadas de 20 e 10 m, respectivamente. A Figura 3.6b exibe uma pseudoseção da densidade de corrente, mostrando uma densidade intensa entre 200 e 250 m, começando a uma profundidade de 15 m, conforme os dados de Karous-Hjelt. Estes resultados também corroboram com as interpretação obtidas com o método geológico.

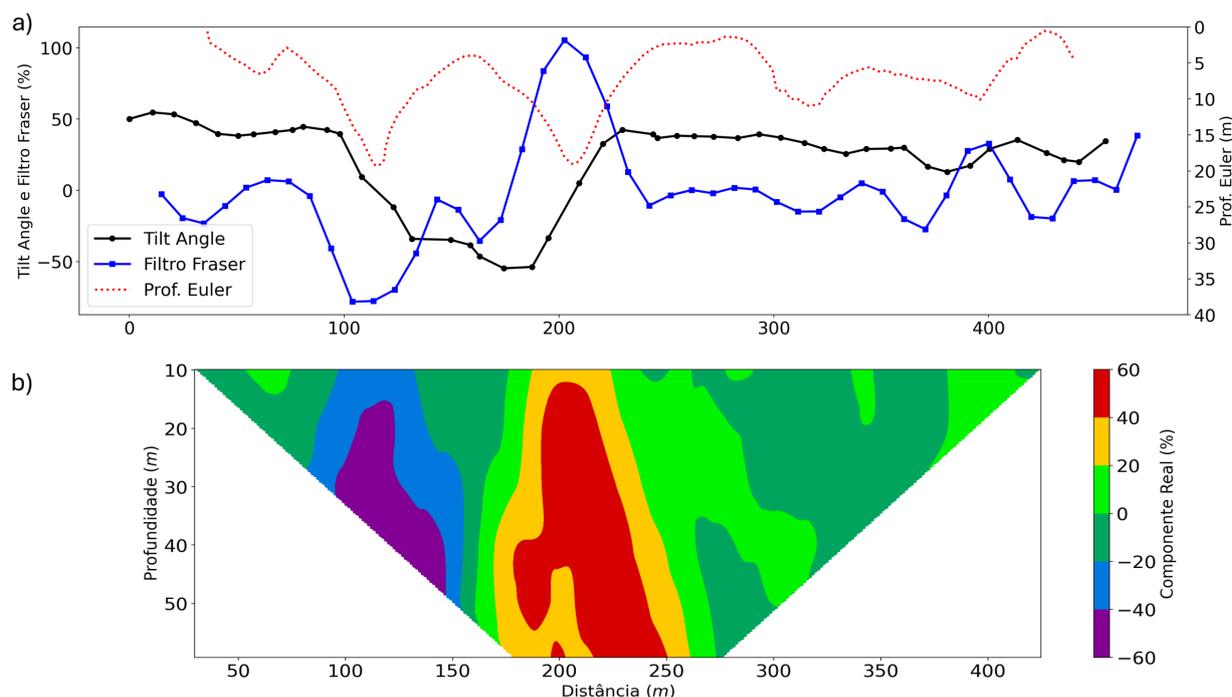


Figura 3.6: Perfil 02 lateral de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos (*Tilt*), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjelt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto.

A Figura 3.7 mostra a interpretação do Perfil 03, alinhado com a direção do aterro sanitário analisado. Na Figura 3.7a, estão os dados de *Tilt Angle*, Fraser e a estimativa de profundidade das fontes condutoras com a Deconvolução de Euler, enquanto a Figura 3.7b apresenta a pseudoseção da densidade de corrente. A análise do ângulo de inclinação revela variações constantes entre 100 e 200 m e entre 300 e 400 m, indicando a distribuição de condutividade nessas áreas. A interpretação das curvas do filtro Fraser e da Deconvolução de Euler identificam três picos positivos associados ao material condutor: um no centro do perfil, em 150 m, com profundidade de 10 m; outro em 350 m, com profundidade de 17 m; e um terceiro na borda do perfil após 350 m, com profundidade inferior a 5 m. Os dados

da densidade de corrente mostram correntes entre 150 e 200 m com inclinação leve e uma corrente de menor intensidade e extensão em 350 m, conforme o filtro Karous-Hjelt, com a primeira corrente iniciando em profundidades rasas e se estendendo até 60 m, e a segunda com um núcleo entre 20 e 30 m de profundidade.

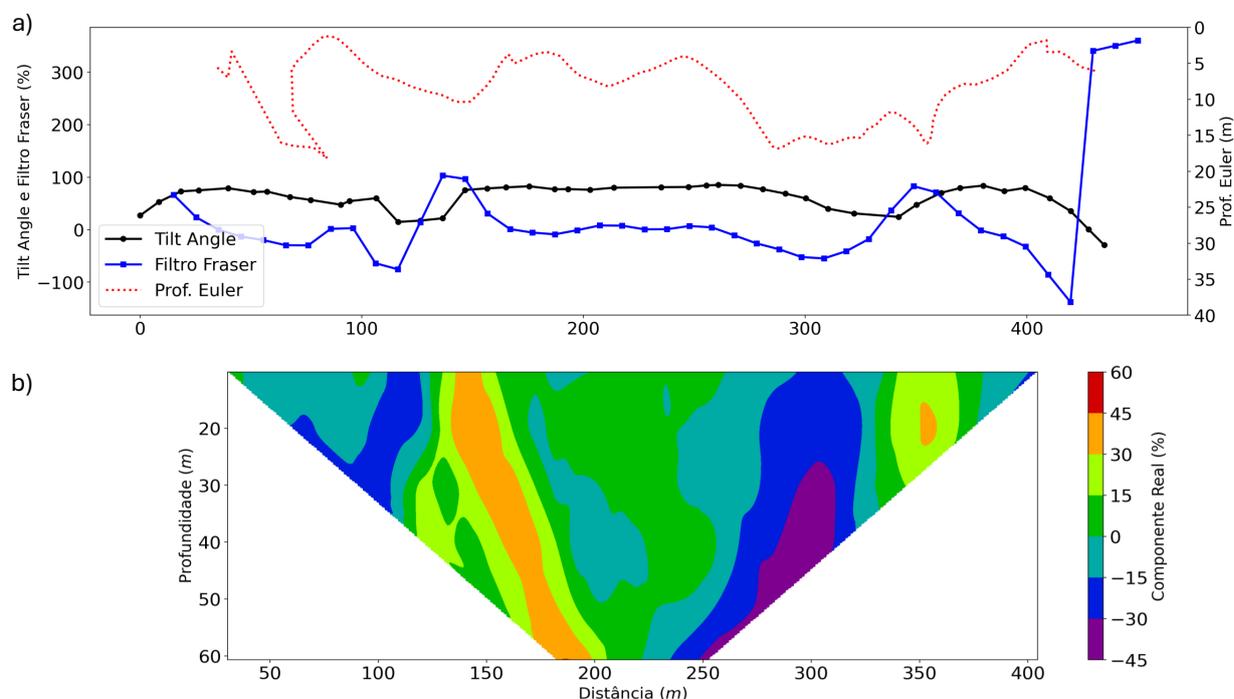


Figura 3.7: Perfil 03 transversal de VLF adquirido no Aterro de Camaçari, em (a) Interpretação das medidas do perfil 03 disposto transversalmente à área de estudo. Dados medidos (*Tilt*), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjelt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto.

### Processamento e Interpretação dos dados de GPR

O processamento dos dados de GPR foi realizado utilizando o software *Reflexw*, com aplicação de etapas de filtragem e ganho para melhorar a razão sinal-ruído e a visualização do radargrama. Dados no formato RADAN (\*.DZT) foram processados, incluindo correção estática, filtros 1D e 2D, e ajustes de ganho. A velocidade do meio foi determinada pela função de velocidade média, permitindo a conversão de tempo para profundidade no perfil através de migração *timedepthconversion*. Os radagramas contendo os dados brutos são apresentados nas Figuras A.6 a A.13 do Apêndice A.

Conforme mencionado anteriormente, o Perfil de GPR (Perfil 3) foi dividido em 8 trechos menores, que foram processados e apresentados nas Figuras 3.8 a 3.15. A velocidade média

das hipérboles encontradas nos radargramas, de 0,065 m/ns, foi utilizada para a interpretação dos perfis, indicando uma velocidade baixa para o terreno, o que sugere que ele é argiloso e/ou saturado com algum fluido condutor. Ao longo desses perfis, foi identificada uma quantidade considerável de hipérboles de difração. Ao analisar a localização dos drenos subterrâneos de chorume (ver Figura 3.1), podemos concluir que a presença dessas tubulações subterrâneas de drenagem justifica a quantidade de hipérboles em alguns trechos dos segmentos do perfil de GPR. Observa-se também que, à medida que se avança para o leste, o sinal do GPR se torna mais fraco, indicando um terreno mais condutivo. Além disso, não há um padrão de refletores retilíneos contínuos, o que sugere a ausência de camadas bem definidas e indica que não houve compactação significativa na construção da estrada lateral do aterro. Para auxiliar na interpretação dos dados de GPR dessa linha, foram aplicados atributos sísmicos em todos os trechos do Perfil 3 (Figuras 3.8 a 3.15): frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente, de cima para baixo.

No primeiro trecho, observa-se um sinal forte de GPR devido à maior presença de areia e menor saturação do solo. Isso pode ser evidenciado pelo atributo envelope (Figura 3.8), onde as cores mais frias representam uma amplitude maior do sinal, indicando uma região menos condutiva, enquanto as cores mais quentes indicam uma amplitude menor do sinal, sugerindo uma região mais condutiva. Neste trecho do perfil é possível identificar algumas hipérboles, especialmente uma que se estende verticalmente até o final do perfil 3, possivelmente associada à presença de eletrodutos, e outras associadas às tubulações de drenagem de chorume. Entretanto, entre 1 e 2 metros de profundidade, o sinal se atenua, sendo possível observar essa descontinuidade vertical bem marcada com os atributos sísmicos de fase e frequência instantânea (Figura 3.8). Há uma diferença na profundidade dessa descontinuidade lateral, marcada pela fase e pela frequência, o que pode indicar uma zona de transição entre duas camadas do solo. Essa diferença sugere que, a essa profundidade, o nível de água pode estar marcado, ou o solo pode se tornar mais argiloso.

No trecho 2 (Figura 3.9), observa-se uma anomalia significativa no início do perfil, onde o atributo envelope define claramente uma feição de alta amplitude, com uma extensão horizontal entre 0 e 10 metros e uma profundidade entre 1 e 3 metros. Isso sugere a presença de um material mais resistivo ou um contraste entre dois materiais com condutividades significativamente diferentes. No contexto de um aterro sanitário, essa anomalia pode indicar a presença de resíduos sólidos poliméricos derivados de hidrocarbonetos abaixo da superfície.

Após os 10 metros, observa-se uma perda do sinal eletromagnético nesse trecho, sugerindo que o solo superficial do aterro nesta área se torna mais condutivo. Essa observação pode

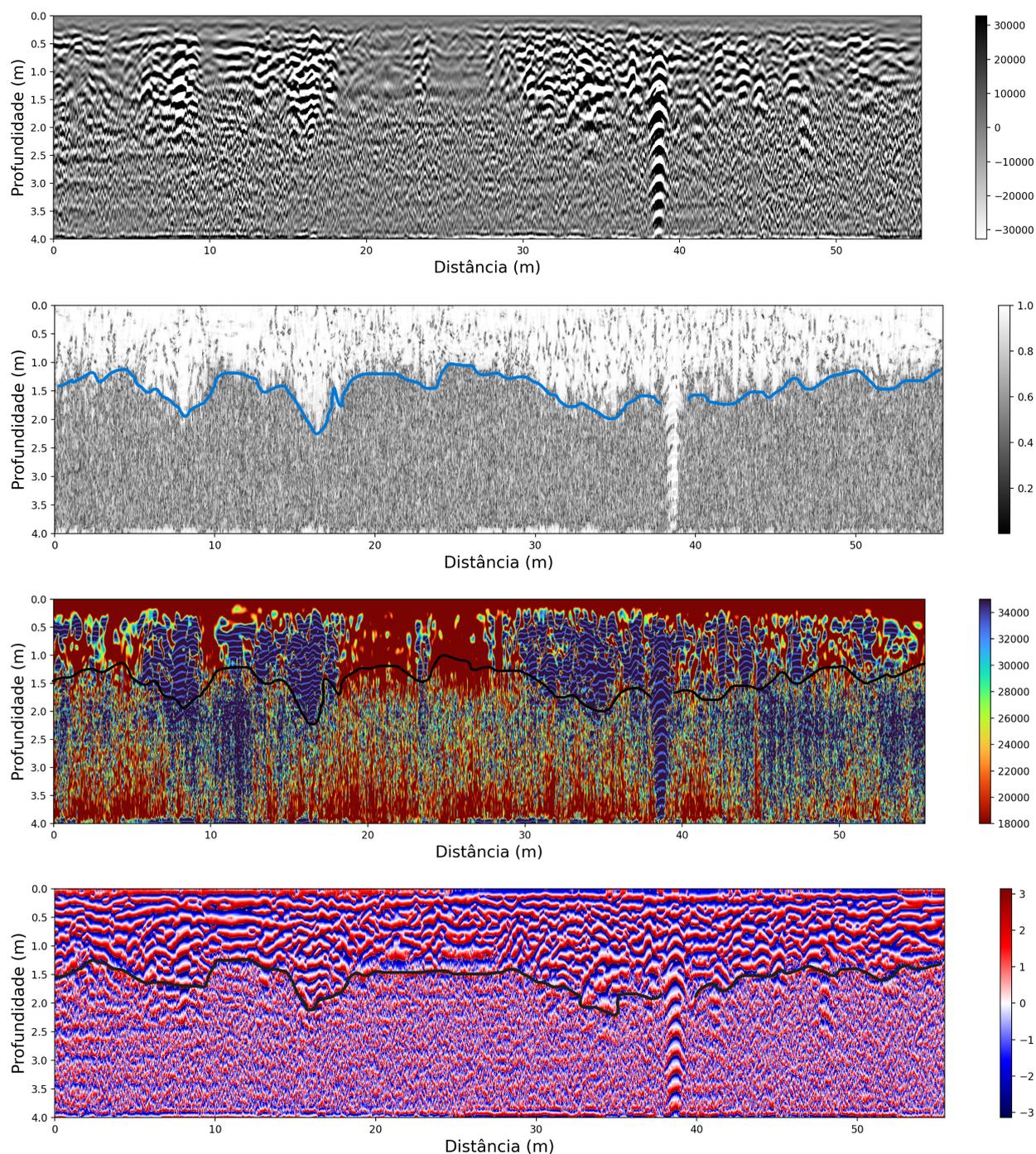


Figura 3.8: Trecho 1 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

ser corroborada ao interpretar conjuntamente com o atributo envelope: acima de 1,5 metros, a partir de 10 metros na escala horizontal, há uma região de baixa amplitude, indicando a mesma área. No entanto, é interessante notar que, após 2 metros, o sinal se intensifica, sugerindo a presença da mesma camada identificada no Trecho 1. Essa camada é mais

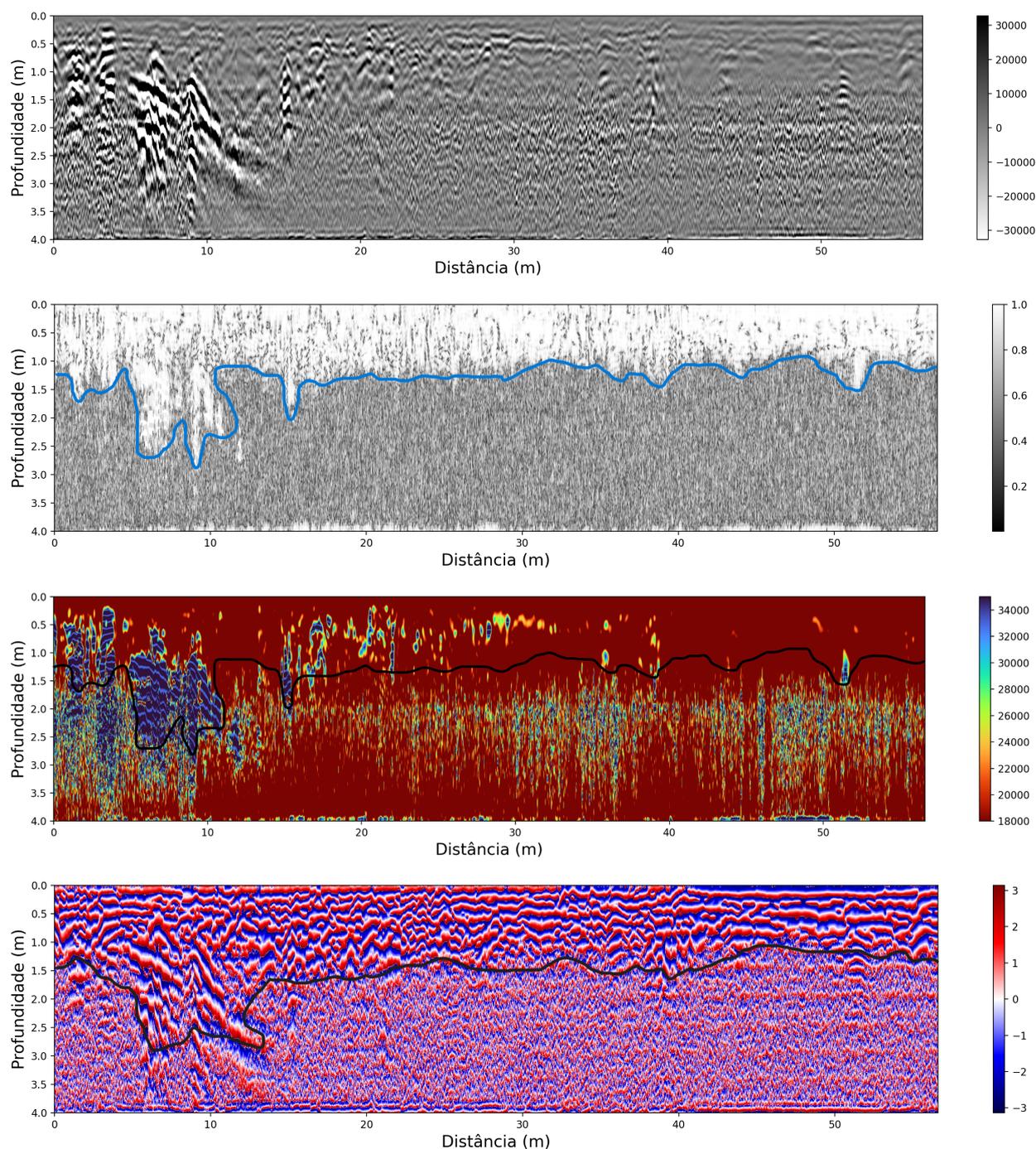


Figura 3.9: Trecho 2 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

condutiva do que o solo superficial no início do Perfil 3 (Trecho 1), mas menos condutiva que o solo superficial do Trecho 2. A camada persiste ao longo de todo o Perfil 3, variando em condutividade em relação à camada de solo superior. Isso pode ser interpretado em conjunto com a descontinuidade vertical a partir de 1,5 metros, conforme mostrado pelos

atributos de fase e frequência instantânea. No entanto, esses dois atributos mostram que, acima de 1,5 metros, tanto a frequência quanto a fase indicam uma região única, o que não é interpretativamente correto, visto que o atributo envelope revela a presença de dois tipos de material.

Foi identificada qualitativamente três zonas de condutividade: alta, média e baixa. A zona de alta condutividade está localizada acima da descontinuidade vertical, conforme indicado pelos atributos de fase e frequência instantânea, apresentando valores acima de 0,8. No envelope, essa zona é representada por partes com cores quentes e valores baixos. A zona de condutividade média está situada abaixo da descontinuidade mencionada e também exibe valores baixos no envelope e cores quentes. Por fim, a zona de baixa condutividade é identificada pelo atributo envelope com cores frias, correspondendo a valores altos no envelope.

Na seção correspondente ao trecho 3 (Figura 3.10), é possível observar locais pontuais com alto valor de envelope (cores frias), bem como algumas hipérboles. Uma dessas hipérboles está associada a um eletroduto, enquanto as outras indicam a drenagem do chorume que flui do corpo do aterro adjacente em direção à unidade de tratamento. Neste trecho, há intercalação de áreas com e sem atenuação da resposta eletromagnética, indicando um solo heterogêneo. A descontinuidade vertical está bem marcada pelos atributos de fase e frequência instantânea, a partir de 1 metro de profundidade.

Nos trechos de 4 a 8 (Figuras 3.11 a 3.15, respectivamente), observa-se a perda do sinal do GPR em grande parte do radargrama. Isso é evidenciado nos perfis do atributo envelope, onde o sinal retorna para indicar a presença de dutos (hipérboles) e possíveis resíduos resistivos na subsuperfície. Em todos esses trechos, é visível a camada inferior, destacada pelas descontinuidades evidenciadas pelos atributos de fase e frequência, indicando a camada de resistividade média que aparece a partir de uma profundidade de aproximadamente 1,60 m. Interpretativamente, pode-se afirmar que, a partir do trecho 4, o solo superficial apresenta alta condutividade, possivelmente devido a fatores como o tipo e a saturação do solo ou a contaminação por chorume, que pode ter sido causada pelo rompimento de dutos de drenagem ou por danos à geomanta de impermeabilização.

A partir desta análise, identificam-se três comportamentos representativos, evidenciados pelas cores nas seções estudadas (Figuras 3.8 a 3.15). Estes comportamentos denotam a presença de regiões mais condutivas, menos condutivas e intermediárias, destacando-se os trechos com maior e menor condutividade.

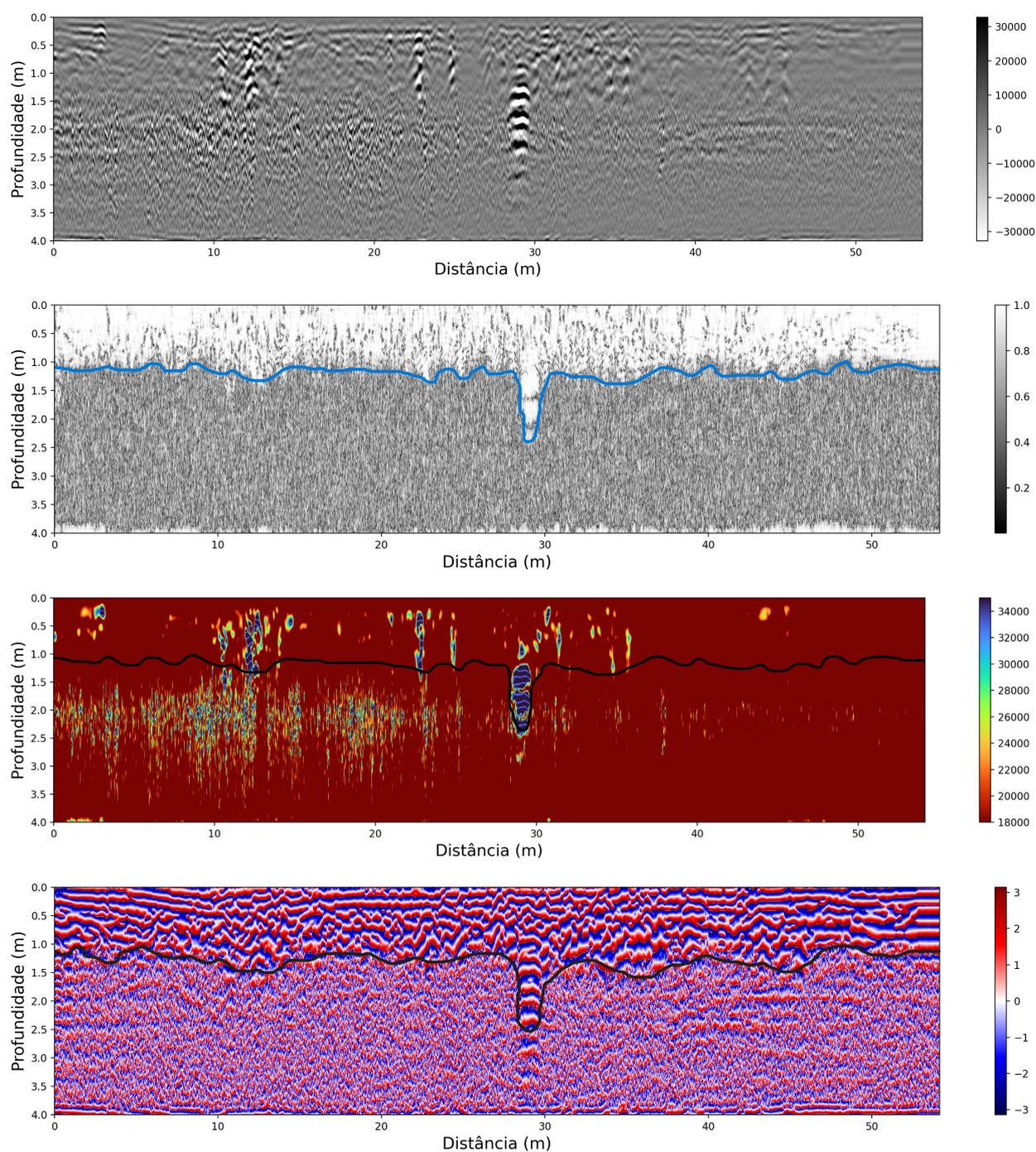


Figura 3.10: Trecho 3 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

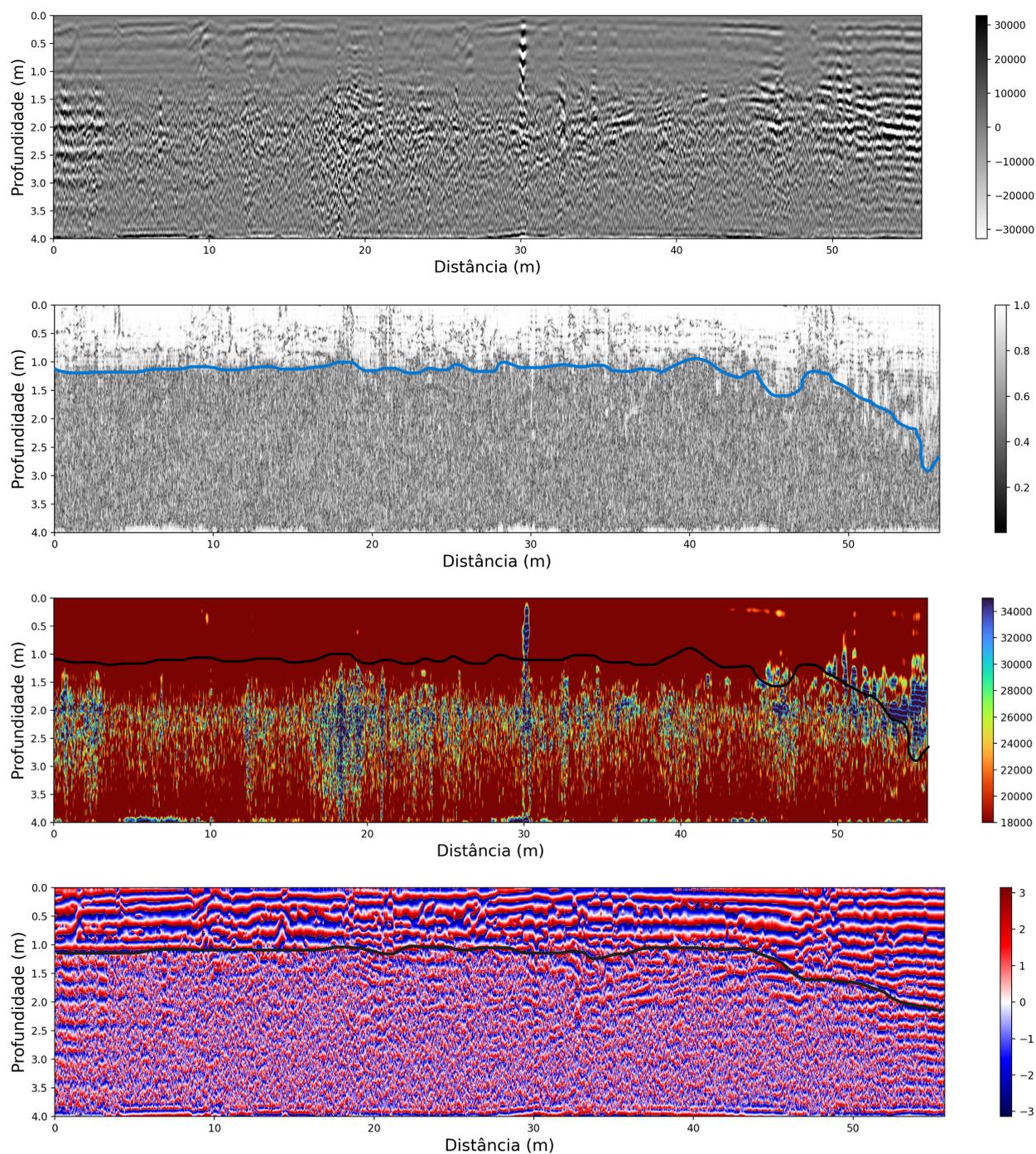


Figura 3.11: Trecho 4 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

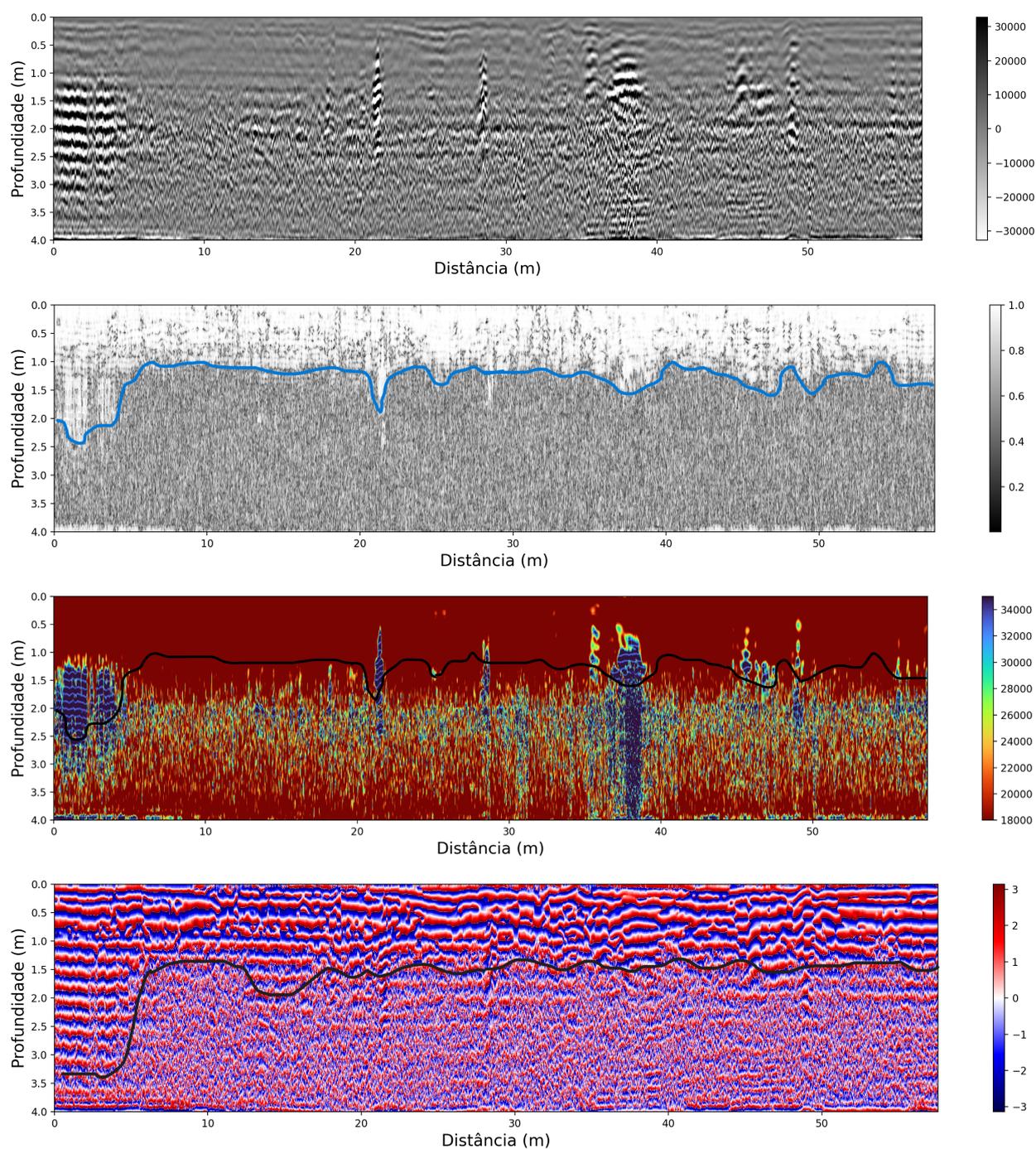


Figura 3.12: Trecho 5 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

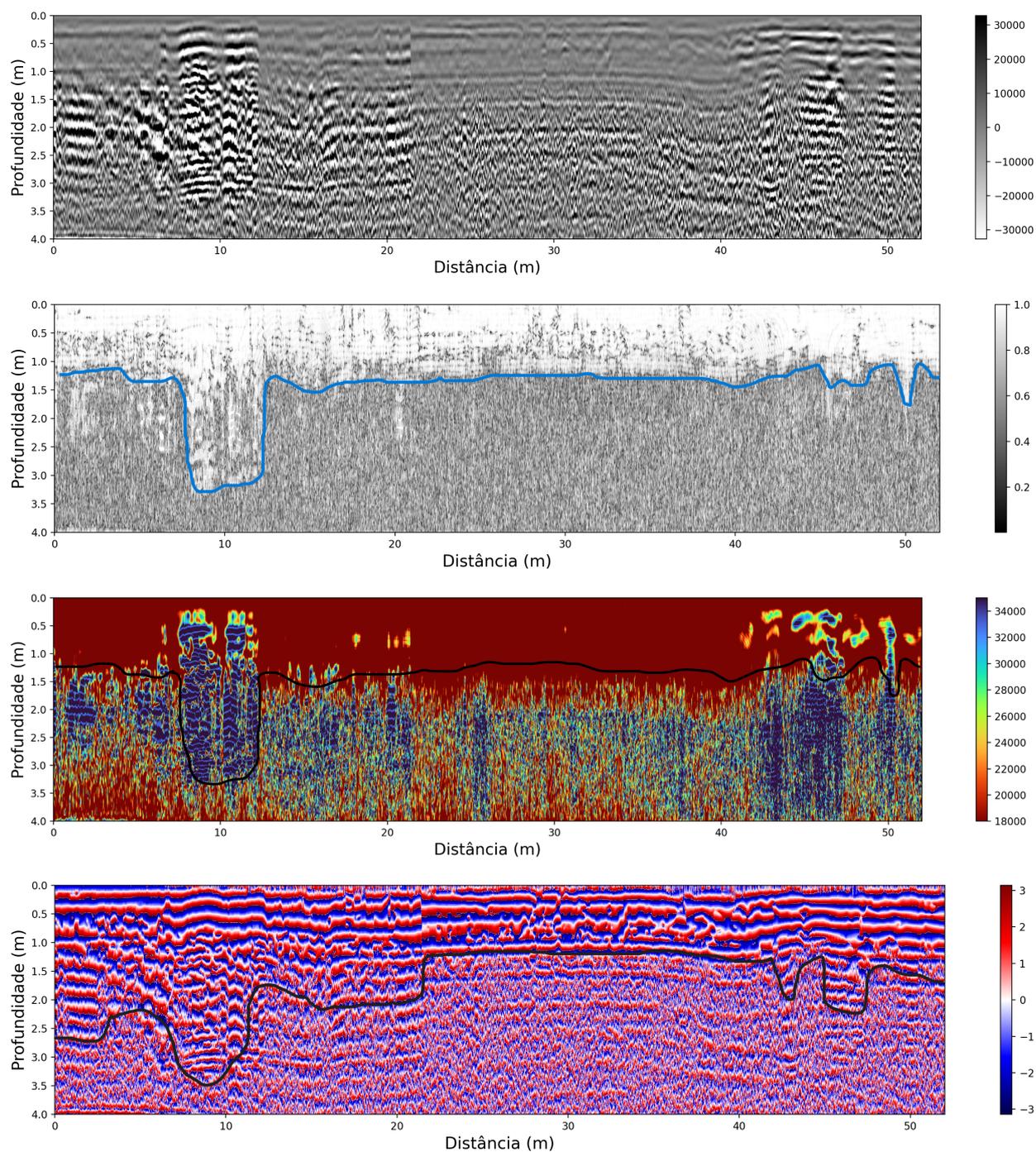


Figura 3.13: Trecho 6 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

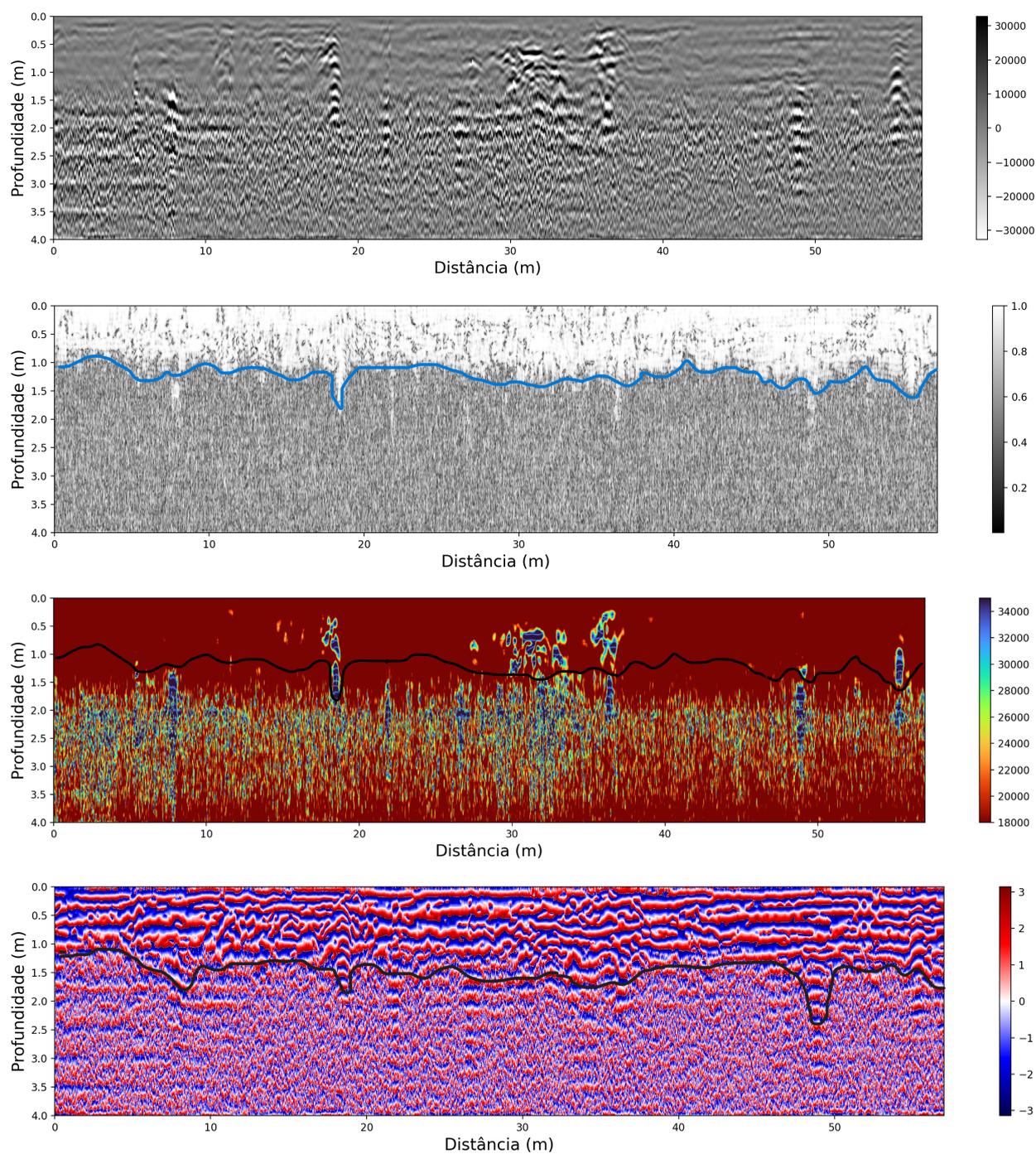


Figura 3.14: Trecho 7 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

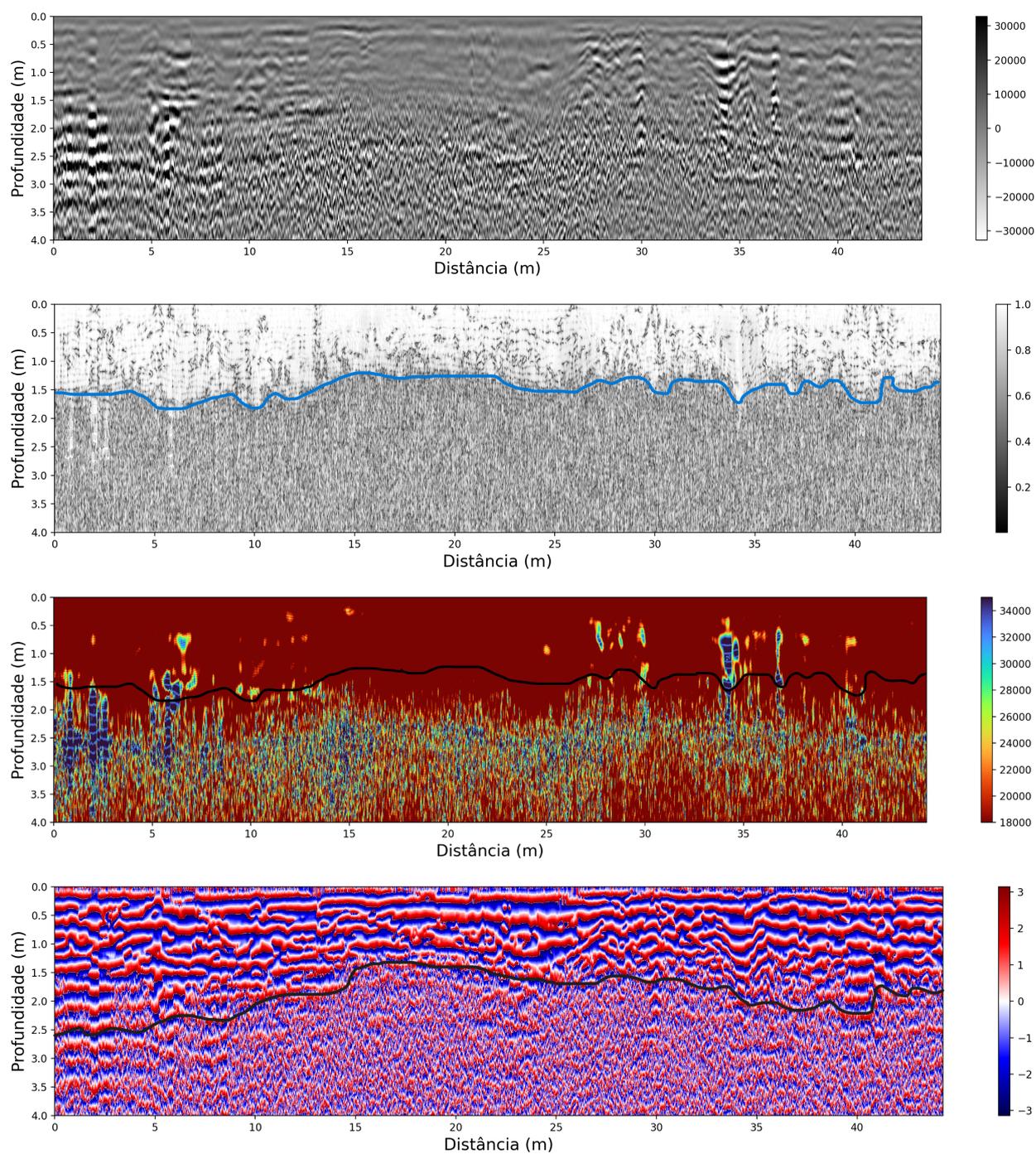


Figura 3.15: Trecho 8 do Perfil 03 de GPR: A primeira seção no topo refere-se aos dados processados, seguida pelas seções geradas a partir dos atributos sísmicos de frequência instantânea, envelope e fase instantânea, respectivamente.

### 3.1.3 Interpretação Conjunta: ER-VLF

A partir dos dados de VLF, foram extrapolados os modelos interpretativos com base nas pseudoseções dos dados de eletrorresistividade. Essa interpretação conjunta é mostrada nas Figuras 3.16 e 3.17, sendo possível visualizar a dinâmica de percolação, com o biogás ascendendo por ser mais leve e o chorume sendo depositado por ser mais pesado. Além disso, as figuras fornecem informações sobre o fundo da cava, que limita o resíduo sólido do solo de fundação do aterro (Figura 3.16), e sobre a extrapolação do limite do chorume (Figura 3.17). Isso sugere que ainda há produção de chorume devido à biodegradação do resíduo sólido no final do Perfil 02, confirmando uma região de biodegradação ativa.

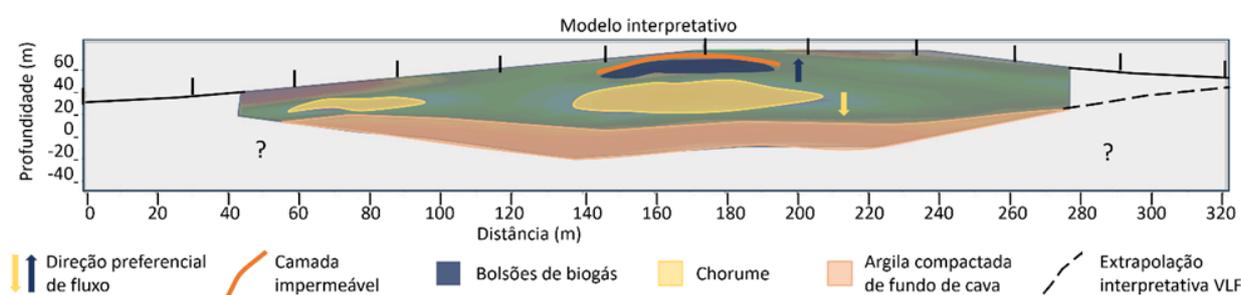


Figura 3.16: Interpretação da distribuição de resistividades do Perfil 01 transversal de Eletrorresistividade com extrapolação auxiliada pelo dado de VLF.

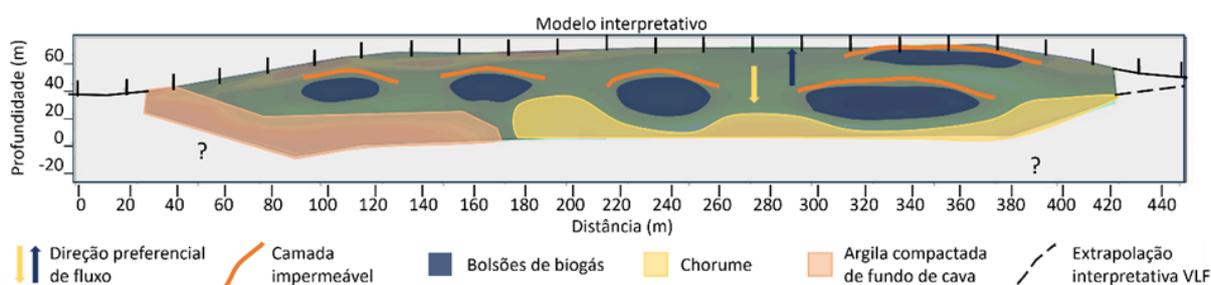


Figura 3.17: Interpretação da distribuição de resistividades do Perfil 02 longitudinal de Eletrorresistividade, com extrapolação auxiliada pelo dado de VLF.

### 3.1.4 Interpretação Conjunta: GPR-VLF

Os dados de GPR e VLF no Perfil 3 apresentam profundidades de investigação bastante distintas, sendo o GPR direcionado para profundidades rasas, enquanto o VLF alcança profundidades maiores. Combinamos os trechos interpretados a partir do atributo de envelope de amplitude do GPR e os interpretamos em conjunto com a pseudosseção obtida pelo filtro Karous até a profundidade de 22 m (Figura 3.18). Observou-se que, no perfil de VLF, há

uma fonte condutiva em torno de 150 m e 350 m de distância, ambas com profundidade de topo estimada pela deconvolução de Euler em 10 m. A seção de envelope de amplitude sugere uma interpretação do nível freático acima desses dois condutores. O levantamento foi realizado um dia após uma alta pluviosidade, o que provavelmente elevou o nível freático, tornando o terreno mais condutivo.

Outra correlação observada é que o início dos perfis de VLF e GPR apresenta um comportamento resistivo em comparação com o restante do perfil. Isso sugere a existência de um limite a partir do qual as fontes condutoras mais profundas, mencionadas anteriormente, não alcançaram a superfície.

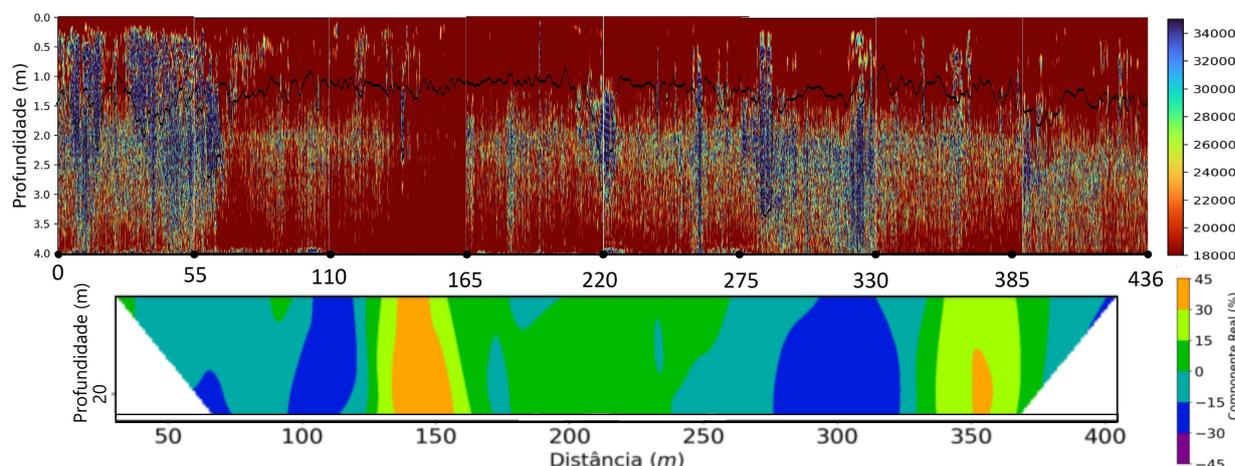


Figura 3.18: Comparação entre o radagrama do Perfil 3 e a pseudosseção obtida pelo filtro Karous para fins de interpretação.

## 3.2 Aquisição, Processamento e Interpretação dos Dados do Aterro Sanitário Metropolitano Centro

Um mapa que localiza a área de estudo, os perfis geofísicos 1 (AA') de ER e VLF, 2 (BB') de VLF, e as linhas 1 (CC'), 2 (DD') e 3 (EE') de GPR é apresentado na Figura 3.19.

### 3.2.1 Aquisição de Dados

Na região do Aterro Metropolitano Centro, a aquisição dos dados de eletroresistividade (ER) foi realizada utilizando um eletroresistivímetro Iris Instruments, com arranjo dipolo-dipolo e metodologia semelhante àquela descrita para o aterro anteriormente (Figura 3.20a). Os dados foram coletados em duas campanhas, planejadas para obter linhas paralelas que cortam o aterro na direção SW-NE. O perfil de ER foi realizado com o objetivo de caracteriza-

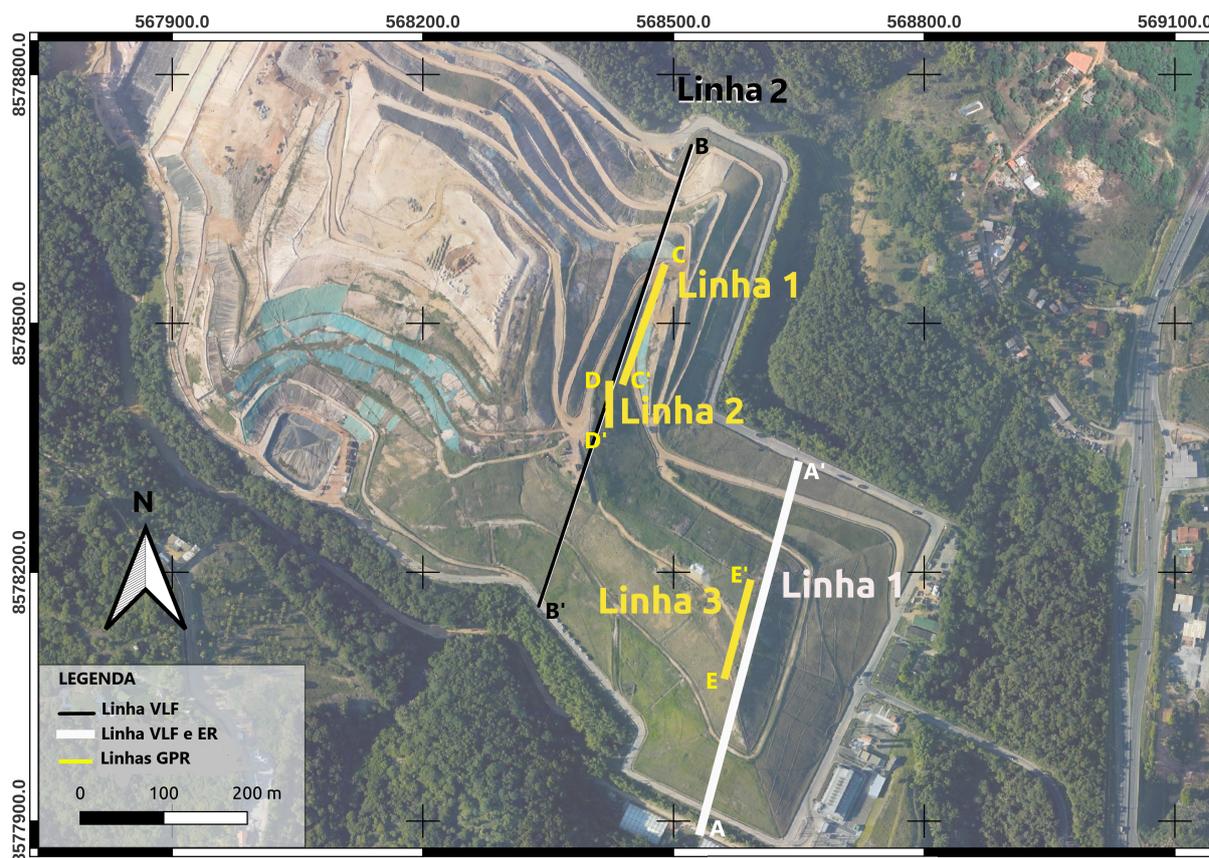


Figura 3.19: Mapa de localização do Aterro Metropolitano Centro mostrando a localização das linhas de perfis geofísicos levantadas, uma de ER, três de GPR e duas de VLF

ção geométrica, avaliação de resíduos com diferentes idades de biodegradação e análise dos percolados. O espaçamento entre os eletrodos foi de 20 metros.

Os dados VLF-EM deste estudo foram adquiridos ao longo dos Perfis 1 e 2 (Figura 3.19), sendo que o Perfil 1 coincide com o perfil de aquisição de ER. As leituras foram realizadas em intervalos de aproximadamente 20 metros para o Perfil 1 e 30 metros ao longo do Perfil 2. Utilizamos o mesmo equipamento T-VLF mencionado anteriormente e também operamos nas frequências de 16 e 24 kHz (Figura 3.20b).

Na execução dos perfis de GPR (Figura 3.20c), constatamos limitações devido à quantidade de obstáculos, desníveis e vegetação ao longo das linhas levantadas. O fato de a aquisição ser contínua não nos permitiu realizar levantamentos nos taludes, optando-se, portanto, por fazer a coleta na berma mais longa e mais alta. Desse modo, foram exibidas e geradas as respostas em distância versus tempo no monitor da unidade de controle. Os dados de GPR foram coletados utilizando uma antena de 200 MHz com a unidade de controle SIR3000 da GSSI.



Figura 3.20: Imagens do levantamento de dados de (a) ER, (b) VLF e (c) GPR.

### 3.2.2 Processamento e Interpretação dos Resultados

A Figura 3.1 apresenta a disposição dos perfis coletados. Esses perfis foram processados e interpretados, e foi necessária a utilização de uma abordagem alternativa para o processamento dos mesmos. Os dados geofísicos resultaram em pseudosseções e perfis, que foram interpretados individualmente para cada método e de forma conjunta para os dados.

#### Processamento e Interpretação dos dados de ER

No Perfil 01, o único perfil de eletrorresistividade realizado no ASMC, aplicou-se a suavização com a Norma  $L^2$  e utilizou-se a inversão *ridge regression* com 25 iterações. A técnica *ridge regression* baseia-se nos mínimos quadrados regulados e foi proposta por (Marquardt, 1963). A primeira inversão realizada com os dados coletados revelou a presença de dados espúrios, o que demandou o uso do módulo de controle de qualidade para a remoção desses pontos (Figura 3.21). Em função disso, esse resultado foi gerado com um RMS no valor de 17,30.

Assim como no estudo anterior, os dados de resistividade são apresentados na Figura 3.25, que contém três seções: a) a pseudosseção dos dados de resistividade aparente coletados em campo; b) os dados calculados a partir das resistividades verdadeiras obtidas pela inversão; e c) a seção de resistividades verdadeiras a ser interpretada, que é utilizada para gerar o modelo interpretativo, conforme mostrado na Figura 3.32.

Para a interpretação deste aterro, foi necessário entender o contexto local em que os perfis geofísicos seriam executados. O início da operação do ASMC foi dividido em etapas, sendo que cada etapa envolvia a criação de uma quantidade específica de células (Filho,

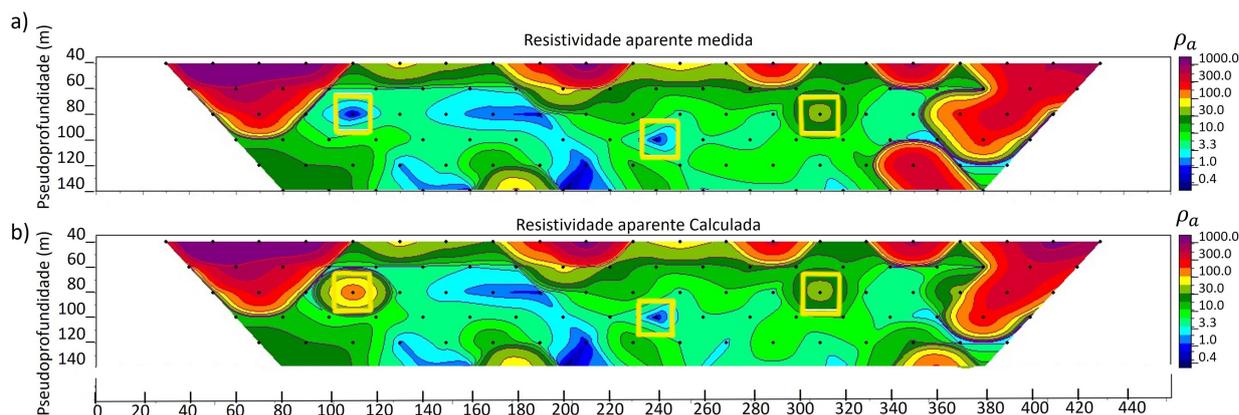


Figura 3.21: Perfil 01 de Eletroresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparente e calculada indicando os dados considerados espúrios.

2011). Após anos de implantação do ASMC, e seguindo as etapas do projeto executivo, para melhor aproveitamento da área e capacidade do aterro, começou-se a dispor os resíduos sobre as células da Etapa I (Figura 3.22). Assim, o que é possível encontrar hoje abaixo da atual célula de resíduos sólidos é algo semelhante ao croqui apresentado na Figura 3.23.

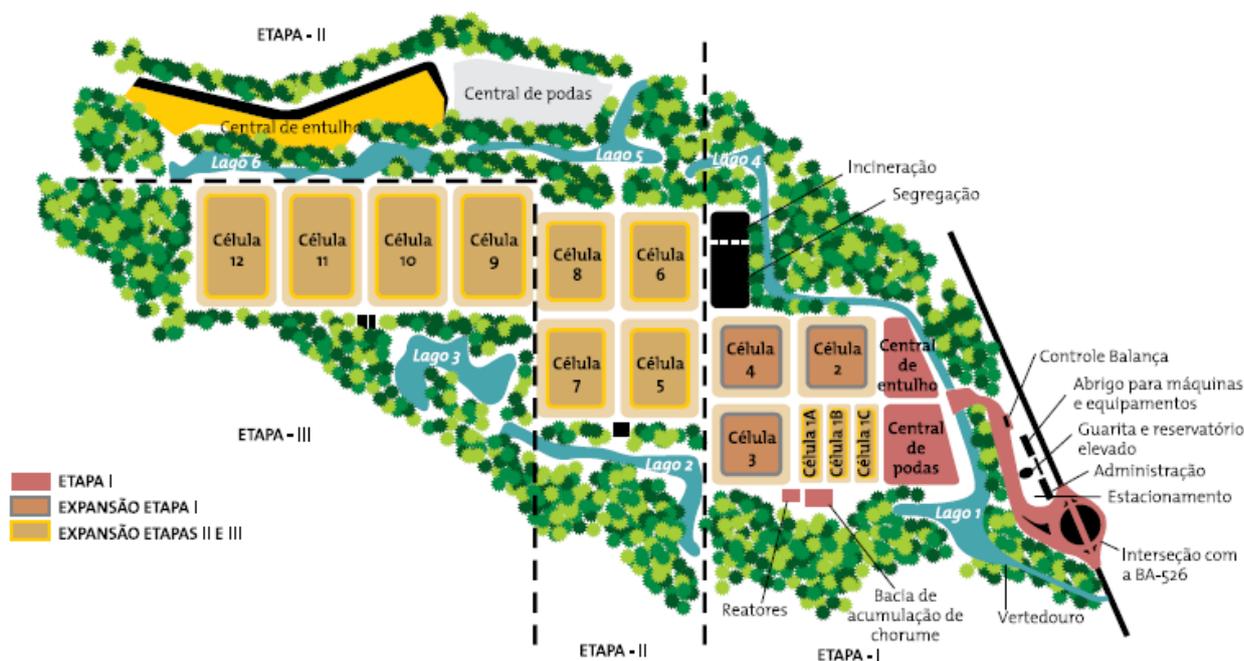


Figura 3.22: Layout do Aterro Metropolitano Centro, baseado no projeto executivo. (Filho, 2011).

No Perfil 1 eletroressitivo (Figura 3.25), observa-se que, nas profundidades mais rasas, ao longo de todo o perfil, há um valor de resistividade bastante elevado, acima de  $200\Omega m$ . Essa parte superior da pseudoseção foi interpretada como bolsões de gás que estão sendo conduzidos por meio de drenos para a usina termelétrica, conforme mostrado na Figura 3.24.

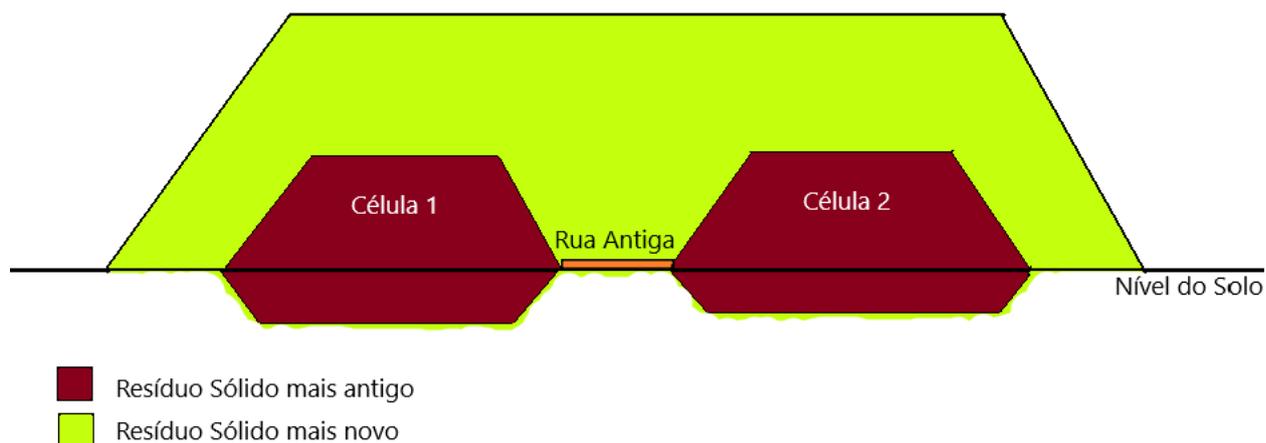


Figura 3.23: Croqui do que seria um perfil cortando a atual célula localizada na antiga Etapa I, do Aterro Metropolitano Centro.



Figura 3.24: Um dos drenos responsáveis por conduzir o biogás para a usina termelétrica do AMC.

Essa região resistiva está muito bem delimitada, o que permitiu traçar uma linha que marca o nível de aumento da condutividade na seção. Logo abaixo desse nível, há uma grande área que é a mais condutiva da seção. Esta região com baixa resistividade, variando entre  $30$  e  $0,6\Omega \cdot m$ , corresponde à camada de resíduo mais recente, sobrepondo os resíduos mais antigos das células 1 e 2. Trata-se de resíduo em processo de biodegradação, resultando na produção de chorume, evidenciado em alguns pontos com resistividade inferior a  $5\Omega \cdot m$ . O chorume produzido desce para a base do aterro, mas é barrado pela impermeabilização e pela cobertura final das duas células antigas. O chorume, então, utiliza o espaço entre as duas células antigas, onde anteriormente havia uma rua, e pelas laterais, para ser posteriormente drenado para a bacia de chorume e tratado.

Abaixo da área mais condutiva da seção, foram identificadas duas regiões com resistividade maior que a do entorno, tanto no início quanto mais para o fim do perfil. Essas duas regiões, com resistividade entre  $100$  e  $300 \Omega \cdot m$ , foram interpretadas como antigas células que foram as primeiras a serem construídas. Por se tratar de resíduo mais antigo, observa-se pouca atividade de biodegradação no centro, o que é justificável pela alta resistividade apresentada. No entanto, nas laterais, a resistividade é mais baixa, sugerindo vestígios de biodegradação ou influência da decomposição do resíduo mais recente acima. Neste levantamento, não foi possível visualizar o fundo da cava.

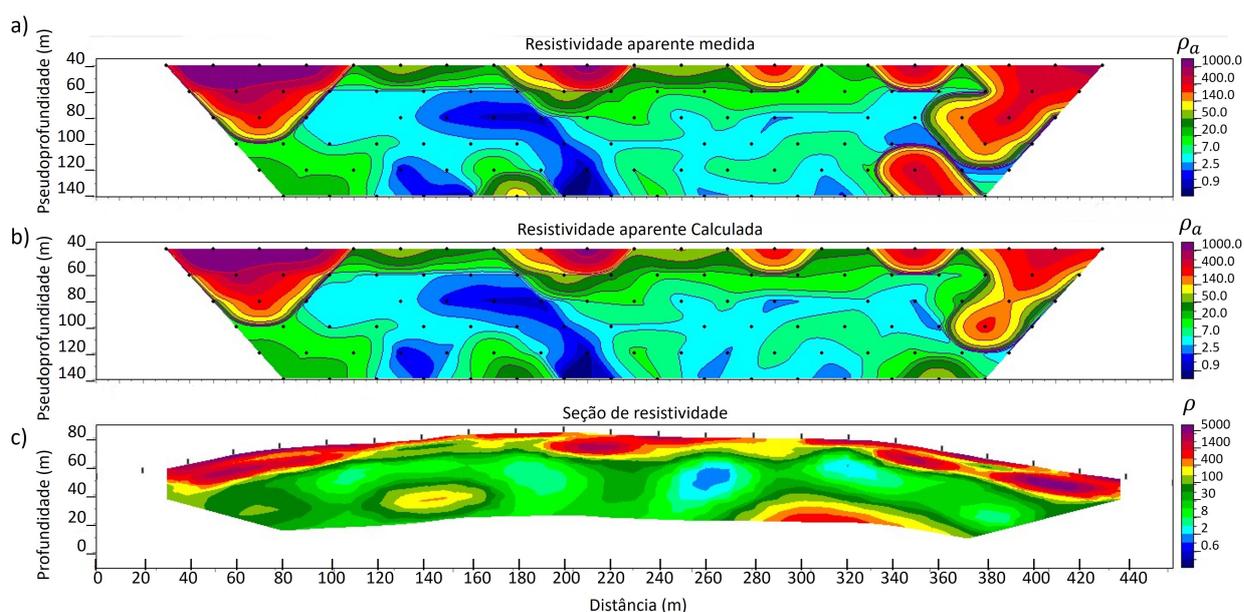


Figura 3.25: Perfil 01 de Eletrorresistividade, com a pseudoseção de resistividade aparente e calculada, sem os dados espúrios, e a seção de resistividade com a topografia.

## Processamento e Interpretação dos dados de VLF

Para o processamento e interpretação qualitativa dos dados de VLF, foram aplicados os mesmos filtros e metodologias utilizados nos dados do Aterro Sanitário de Camaçari: o Filtro Fraser (Fraser, 1969) e o método de Karous-Hjelt (Karous e Hjelt, 1983). Isso resultou na produção de curvas e mapas de contorno da densidade de corrente para auxiliar o processo de interpretação, bem como na aplicação da técnica de Deconvolução de Euler para identificar a profundidade das anomalias encontradas. O valor do índice estrutural utilizado neste caso também foi igual a 1.

As curvas apresentadas nas Figuras A.4 e A.5 do Apêndice A mostram os valores brutos dos dados de *Tilt Angle* e Elipsidade coletados nos Perfis 01 e 02. Os gráficos nas Figuras 3.26

e 3.27 apresentam os valores processados de *Tilt Angle*, Filtro Fraser, pseudoseção Karous e a curva de deconvolução de Euler para os Perfis 01 e 02. A interpretação dos registros de medição do Perfil 01 está ilustrada na Figura 3.26. Nesta figura, são mostradas as variações do Tilt, Fraser e a estimativa da profundidade do topo das fontes condutoras obtida por meio da deconvolução de Euler. Na Figura 3.26b, a pseudoseção da densidade de corrente é exibida. Na curva de Tilt, observa-se que os valores se mantêm aproximadamente constantes após os 50, *m* na escala horizontal, indicando um padrão de distribuição de condutividade com pouca variação lateral. Os valores são mais altos no final do perfil e apresentam um pico no início, sugerindo que essa variação lateral na condutividade pode ser atribuída ao limite entre o terreno natural e a célula de disposição de resíduos sólidos.

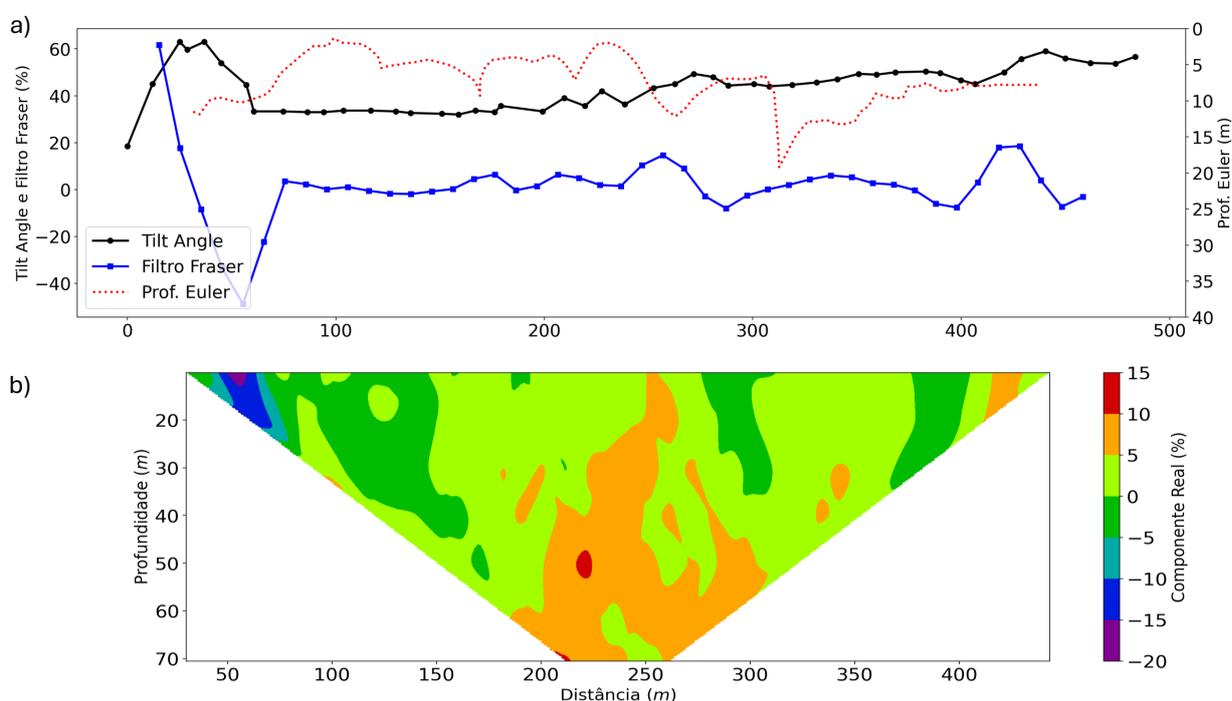


Figura 3.26: Perfil 01 lateral de VLF adquirido no Aterro Metropolitano Centro, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos (*Tilt*), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudoseção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjellt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto.

Os dados de Fraser revelam dois picos positivos de menor intensidade, localizados entre 160 e 200 m e entre 320 e 360 m, e dois picos com um pouco mais de densidade, situados entre 250 e 300 m e entre 400 e 450 m. Além disso, há um pico fortemente positivo na borda inicial do perfil. Esses picos podem indicar a presença de material condutor em subsuperfície. As profundidades definidas pela Deconvolução de Euler, ou seja, as profundidades dos topos desses corpos, são 10, 18, 8, 12, 7 e 12 m, respectivamente.

Observa-se uma densidade de corrente elevada em relação ao restante do perfil entre 200 e 260 m, e outra após 400 m. Estas estão, respectivamente, entre 10 e 60 m e 10 m de profundidade nos dados obtidos de Karous-Hjelt (Figura 3.26b). Ao comparar com os dados de ER coletados na mesma linha, notamos que, exatamente no meio do perfil entre 200 e 260 m, há percolação do chorume produzido pelo resíduo mais recente entre as duas células antigas. As duas laterais são mais resistivas em relação ao meio. As profundidades de Euler referem-se ao topo da geração do material condutor (chorume), que também pode estar relacionado ao topo da célula antiga, atuando como uma barreira para a percolação do líquido, que então escoar pelas laterais dessas células. Portanto, os dados adquiridos pelo primeiro perfil VLF estão em conformidade com a interpretação deste mesmo perfil através do método geoeletrico.

A interpretação dos registros de medição do Perfil 02 está apresentada na Figura 3.27. Na curva de *Tilt Angle*, observam-se valores aproximadamente constantes entre 50 e 120 m e entre 340 e 520 m na escala horizontal, indicando um padrão de distribuição de condutividade com variação lateral considerável. Apesar desses intervalos com pouca variação do Tilt, o perfil apresenta picos nas bordas e entre 200 e 300 m, sugerindo heterogeneidade lateral no perfil. O perfil mostra valores mais altos no início e no final, o que pode indicar variação de condutividade devido à transição entre o terreno natural e a célula de disposição de resíduos sólidos. O aumento do valor de Tilt entre 200 e 300 m pode ser atribuído à diferença entre o material e o resíduo sólido da célula, resultando em diferentes níveis de biodegradação e, conseqüentemente, em uma descontinuidade lateral de condutividade.

Os dados de Fraser mostram três picos de intensidade no perfil: dois de menor e um de maior intensidade, situados nas faixas de 100 a 220 m, 380 a 400 m e 490 a 530 m, respectivamente. Esses picos podem indicar a presença de material condutor na subsuperfície, com profundidades de 25, 15, 8 e 20 m conforme a Deconvolução de Euler. A densidade de corrente elevada observada entre 150 e 210 m e após 480 m sugere a presença de chorume em profundidades variando de 20 a 60 m e 20 a 30 m, respectivamente.

Ainda no Perfil 02, uma área com baixa densidade de corrente, localizada no centro do perfil, pode indicar resíduos mais recentes produzindo mais biogás e menos chorume. O perfil também revela zonas de alta densidade de corrente associadas ao chorume, que parece estar a uma profundidade de 20 a 25 m. O chorume produzido nas células antigas é drenado para as laterais da grande célula única, o que é corroborado pelos dados de Karous-Hjelt que mostram alta densidade de corrente nas bordas da célula.

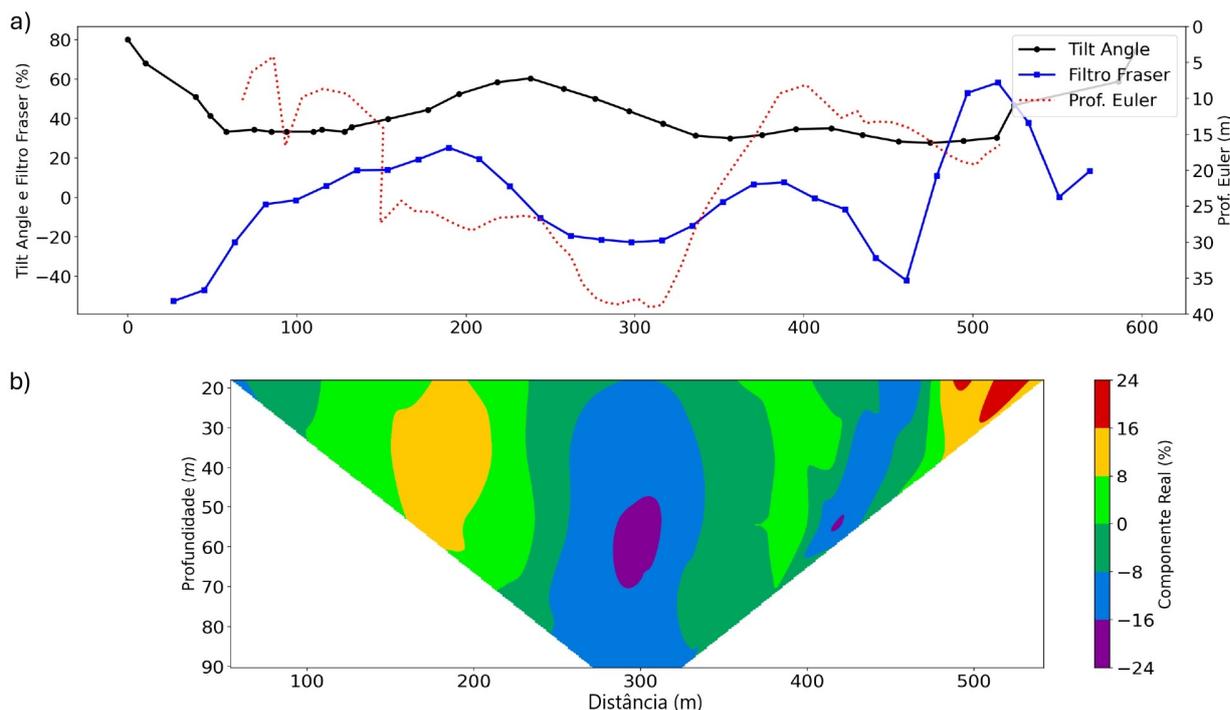


Figura 3.27: Perfil 02 lateral de VLF adquirido no Aterro Metropolitano Centro, em (a) Interpretação das medidas do perfil 02 disposto longitudinalmente à área de estudo. Dados medidos (*Tilt*), filtrados (Fraser) e estimativa da profundidade via Deconvolução de Euler. (b) Pseudo-seção da densidade de corrente (filtro Karous-Hjelt). Os retângulos tracejados indicam as posições da anomalia discutida em texto.

### Processamento e Interpretação dos dados de GPR

O processamento dos dados de GPR deste aterro seguiu uma metodologia semelhante à usada no Aterro de Camaçari, utilizando o software *Reflexw* com as mesmas configurações. Incluiu correção estática, filtros, edição de traços e ajuste de ganho. A velocidade do meio foi definida por ajuste de hipérboles, e o tempo foi convertido em profundidade por meio de uma migração *timedepthconversion*. Os radagramas contendo os dados brutos são apresentados nas Figuras A.14, A.15 e A.16 do Apêndice A.

No ASMC, foram levantados três perfis: dois ao longo do Perfil 2 de VLF (Perfis CC' e DD') e um ao longo do Perfil 1 de VLF e ER (Perfil EE'), com comprimentos de 143, 47 e 123 m, respectivamente. Devido a obstáculos nas linhas dos Perfis 1 e 2, optou-se por perfis na berma ou platô mais plano. As velocidades médias das hipérboles variaram entre 0,0778 e 0,1509 m/ns no Perfil CC', 0,0342 e 0,0488 m/ns no Perfil DD', e 0,0743 e 0,0989 m/ns no Perfil EE'. O Perfil DD' teve velocidade menor devido à saturação e resíduos recentes, enquanto o Perfil EE' teve velocidade mais alta por estar sobre uma célula mais antiga com argila compacta. Foi identificado um padrão de refletos não retilíneos contínuos, sugerindo

a camada de cobertura acima da geomembrana impermeável.



Figura 3.28: Imagem da aquisição de dados, onde é possível verificar (a) a situação superficial do solo (com água, úmido e saturado) do Perfil DD' e do (b) Perfil CC' antes da água.

Para auxiliar na interpretação dos dados de GPR, foram aplicados atributos sísmicos (Figura 3.29): frequência instantânea, envelope e fase, respectivamente de cima para baixo. No Perfil CC' (Figura 3.29), foi possível identificar um refletor contínuo na maior parte do perfil, com profundidade variando entre 0,5 m e 1,0 m. Como o levantamento foi realizado em uma berma onde está sendo implementado um sistema de drenagem de água pluvial, esse refletor pode ser a geomanta impermeabilizante e a camada final da célula de resíduo sólido. Neste perfil, também foi possível observar uma anomalia tanto na fase quanto na frequência instantânea, no final da linha a partir de 90 m na escala horizontal até o final deste perfil, na profundidade de dois metros. Essa anomalia pode estar associada a um tipo específico de material depositado nessa profundidade, que está passando por um processo diferente de biodegradação em comparação com os resíduos ao redor.

Além disso, foi identificada uma faixa de baixa amplitude entre 85 m e 125 m de distância, o que sugere uma região de alta condutividade. Isso indica que pode haver uma maior produção de chorume nessa área em comparação com o entorno. Também foram observados refletores não retilíneos e semicontínuos na horizontal, que podem estar relacionados às camadas de resíduos sólidos compactados.

O Perfil DD' (Figura 3.30) apresentou uma velocidade muito baixa. Isso resultou em uma profundidade limitada durante a migração, não alcançando mais de dois metros de penetração do sinal. Neste trecho, foi identificada uma camada de baixa amplitude (atributo envelope) entre 0,4 e 0,8 m, que aparece nos primeiros 20 metros de distância, tornando-se imperceptível por aproximadamente 20 metros e voltando a ser visível nos 10 metros finais

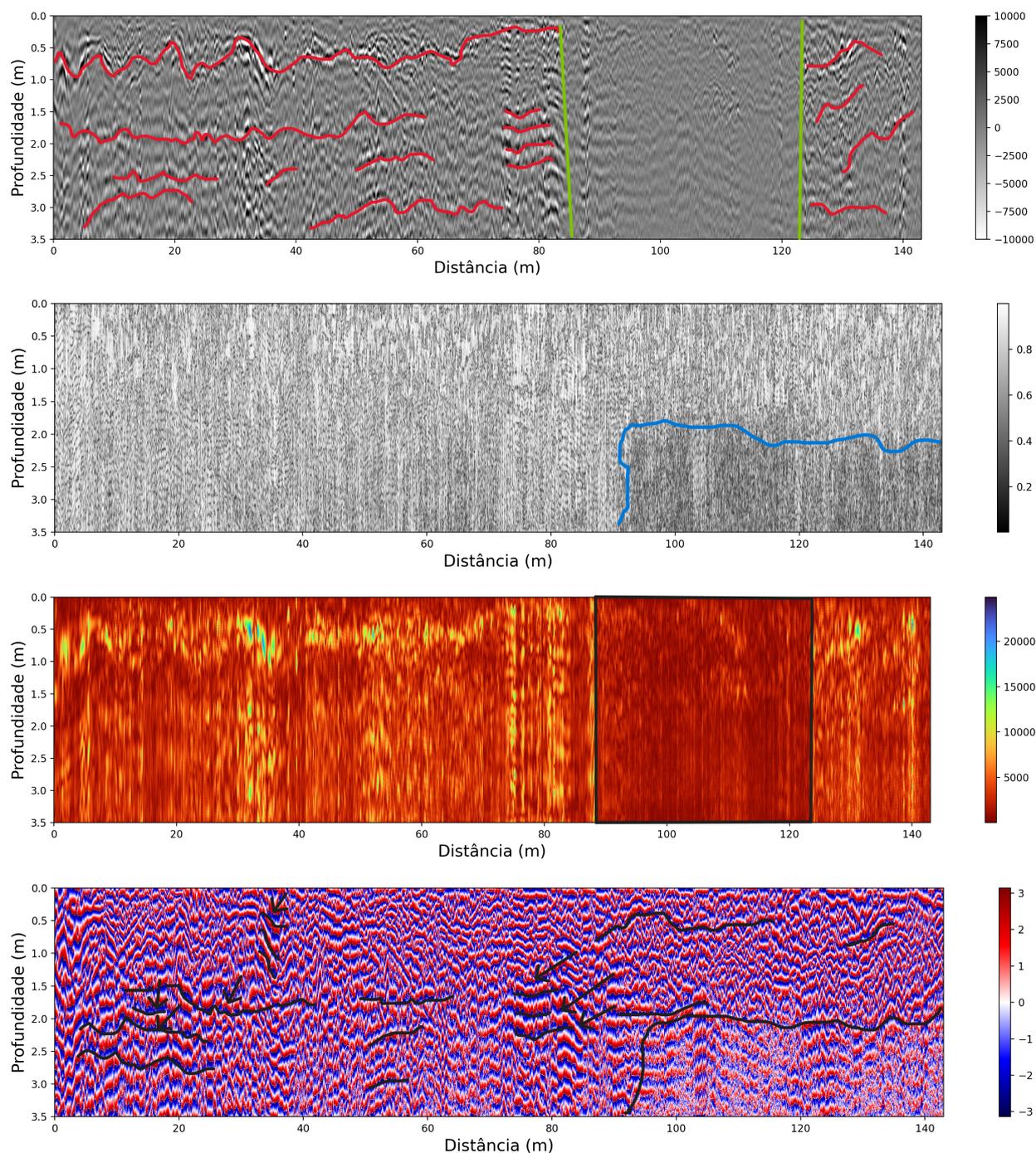


Figura 3.29: Perfil CC' gerado pelo método GPR, destacando um trecho coincidente com a direção e sentido do Perfil 02 de VLF. Os seguintes atributos sísmicos foram aplicados, na ordem: frequência instantânea, envelope e fase instantânea.

do perfil. Esta feição pode estar associada ao caminho preferencial de algum fluido localizado acima da geomembrana de impermeabilização, possivelmente água pluvial acumulada em pequenas profundidades e escoando através de uma camada de solo drenante para fora do corpo do aterro. O atributo de frequência instantânea não apresentou feições ou anomalias.

lias passíveis de interpretação, enquanto o atributo de fase revelou diversos refletores não retilíneos e descontínuos, indicando que provavelmente representam as várias camadas de compactação dos resíduos sólidos.

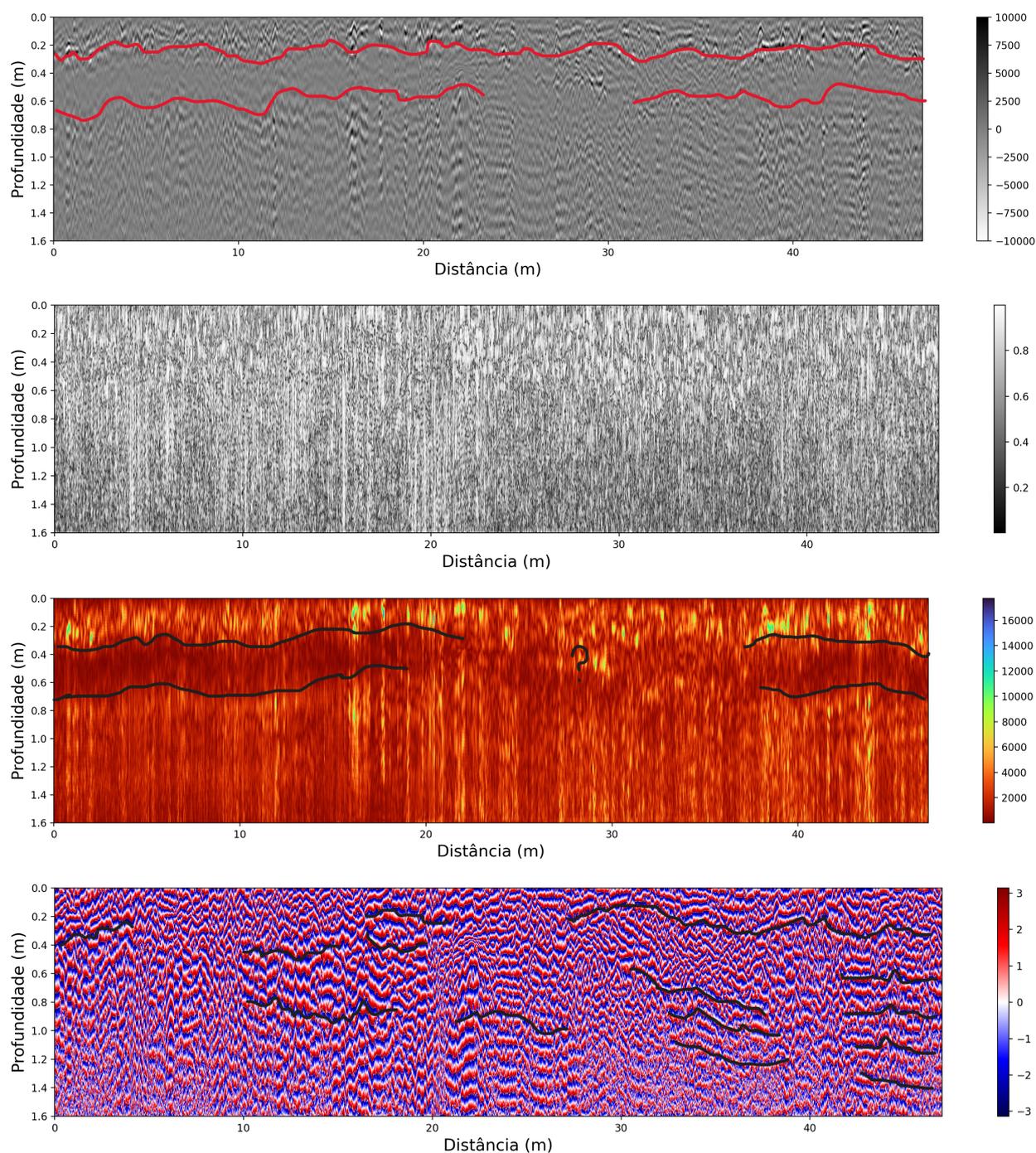


Figura 3.30: O Perfil DD', gerado pelo método GPR, mostra um trecho que coincide com a direção e o sentido do Perfil 02 de VLF. Os seguintes atributos sísmicos foram aplicados, na ordem: frequência instantânea, envelope e fase instantânea.

O perfil EE' (Figura 3.31) foi realizado no topo da célula onde não há mais atividade.

Nesse dado, foi mais fácil identificar a descontinuidade entre a camada de cobertura e a geomembrana de cobertura/impermeabilização. Por se tratar de uma parte do aterro que há muito tempo não está em atividade, inclusive com cobertura de gramíneas, o solo foi mais compactado e trabalhado para uma melhor finalização da célula de resíduos. Aparentemente, a geomembrana está a uma profundidade entre 0,5 e 1,0 *m*. Essa descontinuidade vertical está bem marcada no atributo de frequência instantânea, com uma clara distinção nos primeiros metros de profundidade dos valores desse atributo: acima e abaixo de 0,8. O atributo de fase instantânea também foi útil na delimitação dessa camada devido à sua propriedade de acentuar as descontinuidade laterais, assim como os refletores mais profundos, indicando as várias camadas de resíduos, em torno de 50 a 60 *cm*. Por fim, o atributo de envelope auxiliou na delimitação da descontinuidade mais rasa, devido à alta amplitude do refletor. Além dessa informação, o atributo envelope delimitou duas faixas de baixa amplitude nos primeiros e últimos metros de distância da linha. Talvez, devido a esses limites estarem próximos do sistema de drenagem pluvial, a subsuperfície possa estar úmida ou saturada, atenuando assim o sinal do radar.

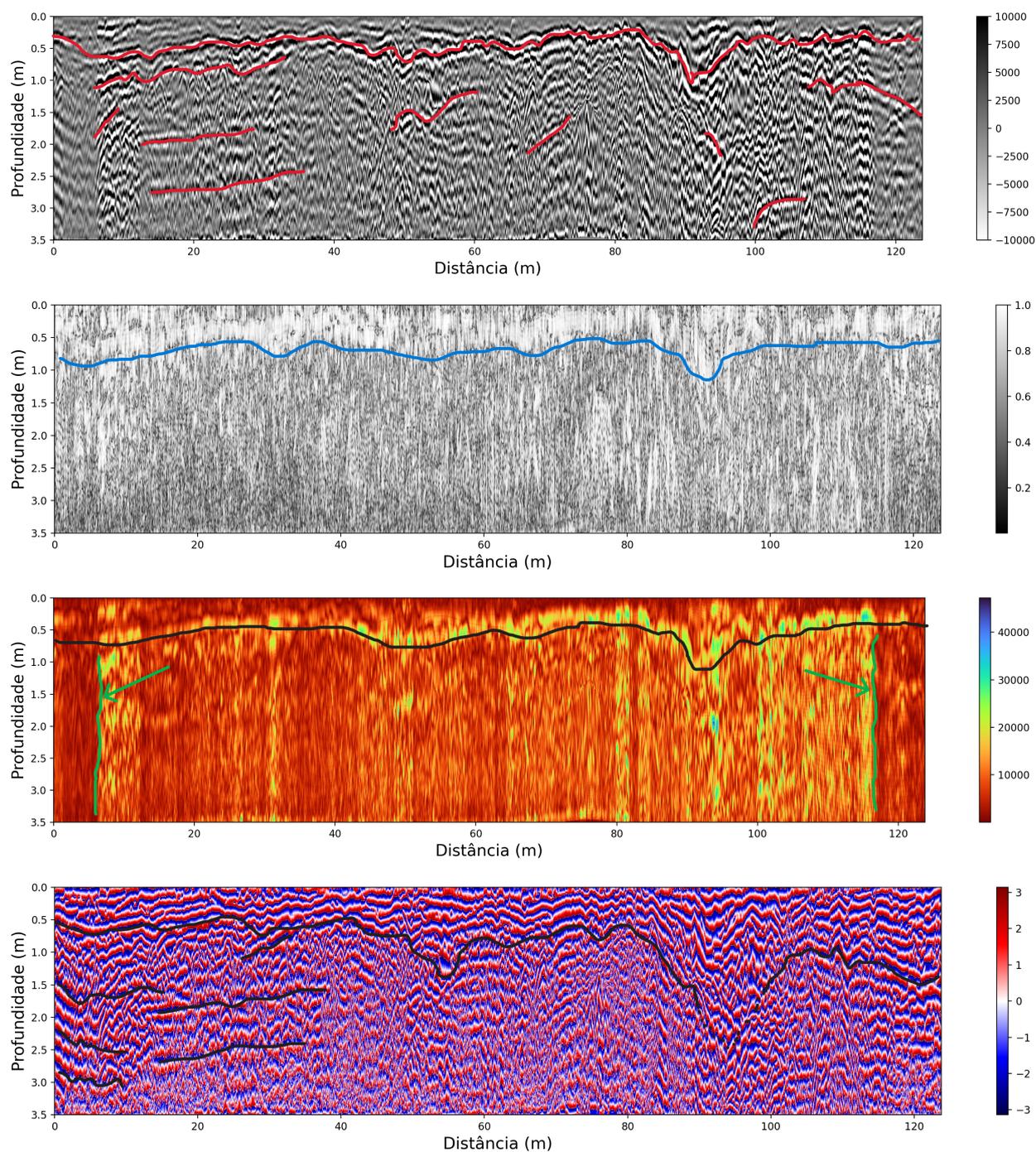


Figura 3.31: Perfil EE' obtido pelo método GPR, mostrando um trecho coincidente com a direção e o sentido do Perfil 01 de VLF e ER. Apresenta, na seguinte ordem, os atributos sísmicos aplicados: frequência instantânea, envelope e fase instantânea.

### 3.2.3 Interpretação conjunta: ER-VLF

A partir dos dados de VLF, das informações históricas sobre o funcionamento do aterro e do conhecimento da dinâmica dos fluidos produzidos na célula, foi possível extrapolar os modelos interpretativos com base nas pseudoseções dos dados de eletrorresistividade e VLF. Na Figura 3.32, é possível observar a dinâmica de percolação da célula mais antiga. O biogás, sendo mais leve, ascende em direção aos pontos de drenagem de gás, onde a resposta é menos resistiva devido ao menor acúmulo de gás. O chorume é escoado pelo caminho preferencial e de menor resistência, que é o espaço entre as duas células mais antigas, estando ambas a uma profundidade de 50 metros em relação ao topo da célula atual. O VLF auxiliou na extrapolação do nível de aumento da condutividade, indicando que a condutividade é rasa no final do perfil e se torna profunda no início, devido à influência da fundação do aterro.

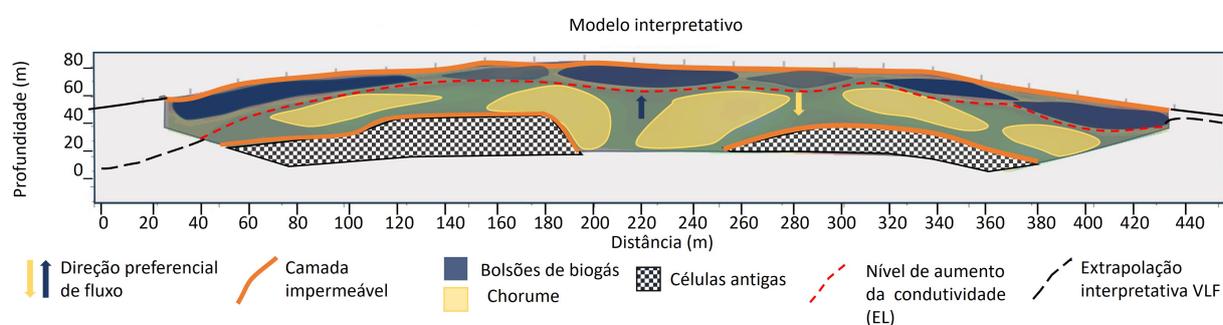


Figura 3.32: Interpretação da distribuição de resistividades no Perfil 01 de eletrorresistividade, com extrapolação auxiliada pelos dados de VLF

# 4

## Conclusões

Na investigação geofísica do Aterro Sanitário de Camaçari (ASC), foram desenvolvidos modelos interpretativos para descrever o leito da cava, os volumes de chorume e biogás. O método de eletrorresistividade foi utilizado para localizar o biogás e o chorume, além de identificar o fundo da cava do aterro, que varia entre 25 e 60 metros de profundidade. Esses dados revelaram a dinâmica dos fluidos dentro do aterro, indicando a acumulação de biogás próximo à superfície e a infiltração de chorume em direção ao fundo da cava. A interpretação dos dados sugere a necessidade de aprofundamento da cava ou a preocupação com a contaminação do fundo. A combinação dos dados de VLF e eletrorresistividade ajudou a determinar a profundidade da investigação, confirmando a presença de uma membrana impermeável em pontos do aterro.

A resposta do VLF foi crucial para identificar uma possível fonte de contaminação no mesmo local onde foi realizado o perfil de GPR, ajudando a explicar a atenuação do sinal de GPR ao longo de grande parte do perfil. O GPR, como um método eletromagnético de alta frequência, forneceu detalhes para profundidades rasas, revelando diferentes zonas de condutividade. Em todos os perfis, foi identificada uma camada a aproximadamente dois metros de profundidade, interpretada como o nível freático, com uma resposta média de condutividade no GPR. Em grande parte do perfil, houve perda de sinal devido à alta condutividade local do solo, indicando a presença de argila altamente condutiva ou solo contaminado com chorume. Somente no início do perfil e em áreas com baixa condutividade, onde a relação sinal/ruído era melhor, foram identificadas mais características, como hipérbolos de difração associadas a tubulações de drenagem de chorume e águas pluviais.

Na investigação geofísica do Aterro Sanitário Metropolitano Centro (ASMC), foram de-

envolvidos modelos interpretativos para identificar características pretéritas e informações sobre a estrutura que compõe o aterro, incluindo drenos, impermeabilização e cobertura, além dos volumes de chorume e biogás. O método de eletrorresistividade foi utilizado para localizar o biogás e o chorume, bem como para entender sua dinâmica de percolação. Também foi possível identificar as duas células antigas, localizadas a cerca de 40 metros de profundidade. Esses dados revelaram a dinâmica dos fluidos dentro do aterro, indicando a acumulação de biogás próximo à superfície e sua distribuição desigual em relação aos drenos, além da infiltração de chorume em direção ao fundo da cava, situando-se entre as células mais antigas. A combinação dos dados de VLF e eletrorresistividade auxiliou na determinação da profundidade das anomalias condutivas no aterro (os pontos de geração mais intensa de chorume) e na identificação da presença de um nível condutivo ao longo de toda a extensão da célula do aterro.

A resposta do VLF foi crucial para diferenciar a resposta eletromagnética dos resíduos em diferentes estágios de biodegradação. O GPR forneceu informações sobre as profundidades rasas nas bermas e platôs de algumas pilhas de resíduos, revelando variações na profundidade da geomembrana e na impermeabilização, além de diferentes respostas e camadas dos resíduos sólidos compactados. Em todos os perfis, foi identificada uma camada de cobertura final. Nos dois primeiros perfis de GPR, a amplitude do sinal foi menor devido à alta condutividade local do solo, o que sugere a presença de resíduos recentes com alta produção de chorume e sua subsequente percolação para os drenos. No terceiro perfil, os dados apresentaram um sinal eletromagnético mais forte, provavelmente devido ao tempo de inatividade daquele platô no aterro. Portanto, a investigação geofísica forneceu *insights* valiosos sobre a dinâmica de fluidos e a estrutura dos Aterros estudados.

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus por ter me concedido forças para concluir este mestrado, com todas as suas idas e vindas. Quero expressar minha gratidão aos meus queridos pais, Dinalva e Genivaldo, às minhas adoráveis irmãs Andresa e Lizandra, e aos meus lindos sobrinhos Lucas Gabriel, Maria Clara, Davi Luiz e Ana Júlia, que me alegraram com seus vídeos em tempos tão corridos. Agradeço também à minha segunda família em Salvador, minha madrinha Marineise e meus primos.

Agradeço ao meu orientador, Joelson Conceição, à minha coorientadora, Suzan Vasconcelos, e ao professor Diego, por toda a paciência, orientação e empatia ao longo destes dois anos, contribuindo com conhecimento sobre a geofísica e sempre auxiliando na medida do possível. Quero também expressar minha gratidão aos meus professores e mestres ao longo da minha trajetória acadêmica e escolar: UFBA, UnB, Unifacs, COLUNI, CIEC, Escolinha Grão de Areia e Coopec, que desempenharam um papel fundamental na formação da pessoa que sou hoje.

Um agradecimento especial aos meus colegas e amigos da UFBA, a maioria dos quais conheci durante a graduação; e, em especial, a Armando, por ter me dado uma luz e auxiliado nos acréscimos do segundo tempo. Agradeço a todos os meus companheiros de vários semestres, às minhas amigas de toda a vida: Jamille Kelly, sempre presente, que eu amo com todo o coração; Karina Cardoso, Karina Santana, Bruna Carvalho e Rebeca Tavares, por estarem sempre ao meu lado, me dando forças e conselhos para seguir em frente, e que amo profundamente. Tenho gratidão a todos os meus amigos que fiz em Salvador, em especial a Fábio Almeida, meu segundo pai; Alberto Gezler, meu namorado; meus colegas de apartamento; meus amigos do Auto da Compadecida (elenco, direção e produção), que levarei para a vida; e aos meus colegas do teatro, por terem tornado minha estadia em Salvador agradável e leve.

# Apêndice A

## Dados Brutos

Neste apêndice, serão apresentadas as curvas e imagens dos radagramas que representam os dados brutos de quatro perfis de eletroresistividade, sete perfis de VLF e onze perfis de GPR, coletados no Aterro de Camaçari e no Aterro Metropolitano Centro.

### A.0.1 Perfis de VLF do Aterro Sanitário de Camaçari

Perfis resultantes da filtragem dos dados Brutos adquiridos no Aterro de Camaçari, mostrados nas Figuras A.1, A.2 e A.3.

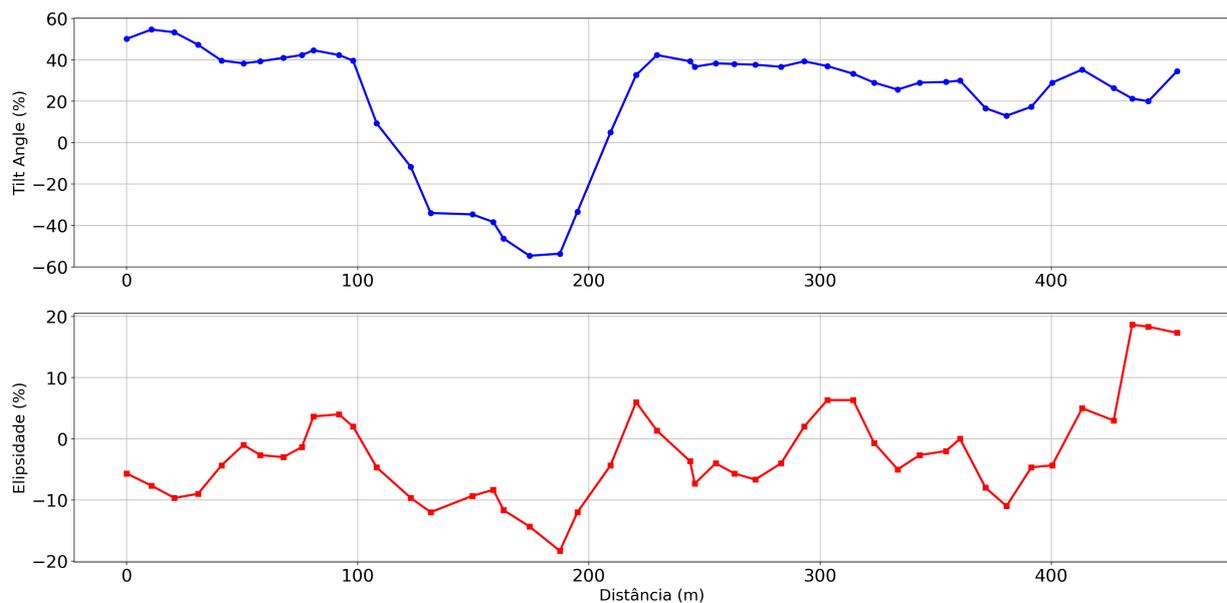


Figura A.1: Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 1 no Aterro de Camaçari. Frequência de  $24kHz$ .

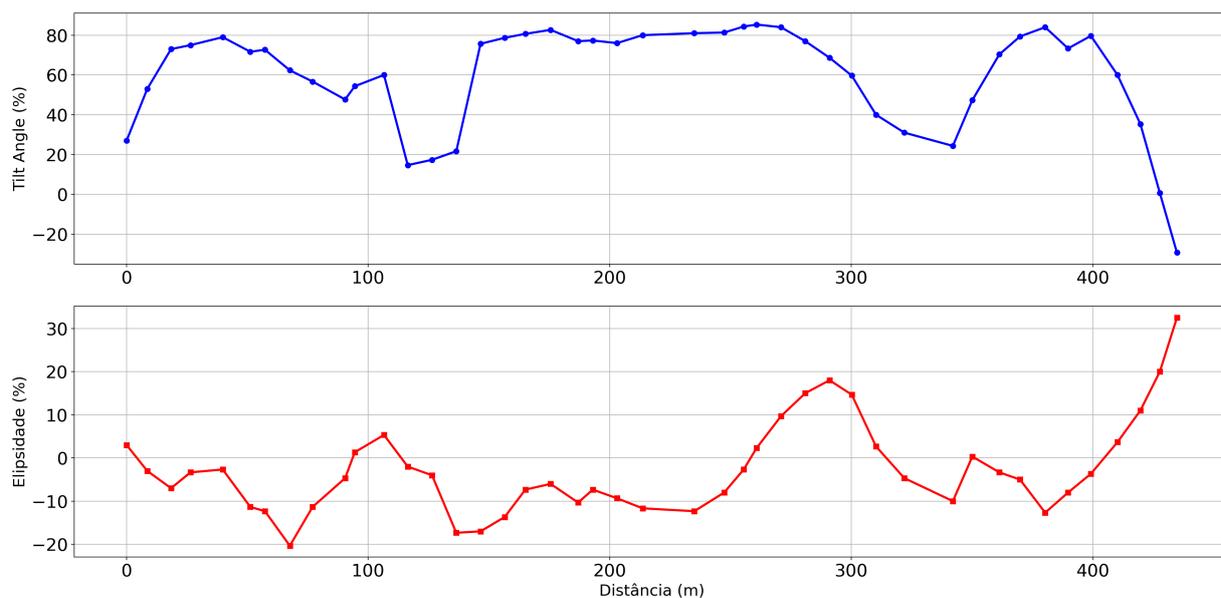


Figura A.2: Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 2 no Aterro de Camaçari. Frequência de  $24kHz$ .

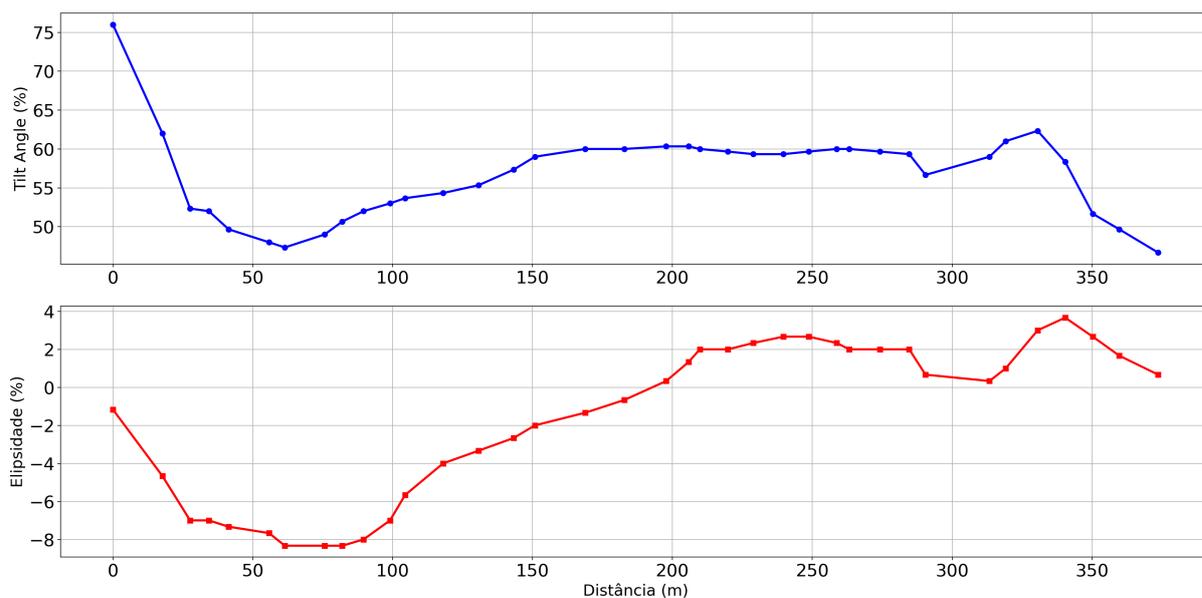


Figura A.3: Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 3 no Aterro de Camaçari. Frequência de  $24kHz$ .

### A.0.2 Perfis de VLF do Aterro Metropolitano Centro

Perfis resultantes da filtragem dos dados Brutos adquiridos no Aterro Metropolitano Centro, mostrados nas Figuras A.4 e A.5.

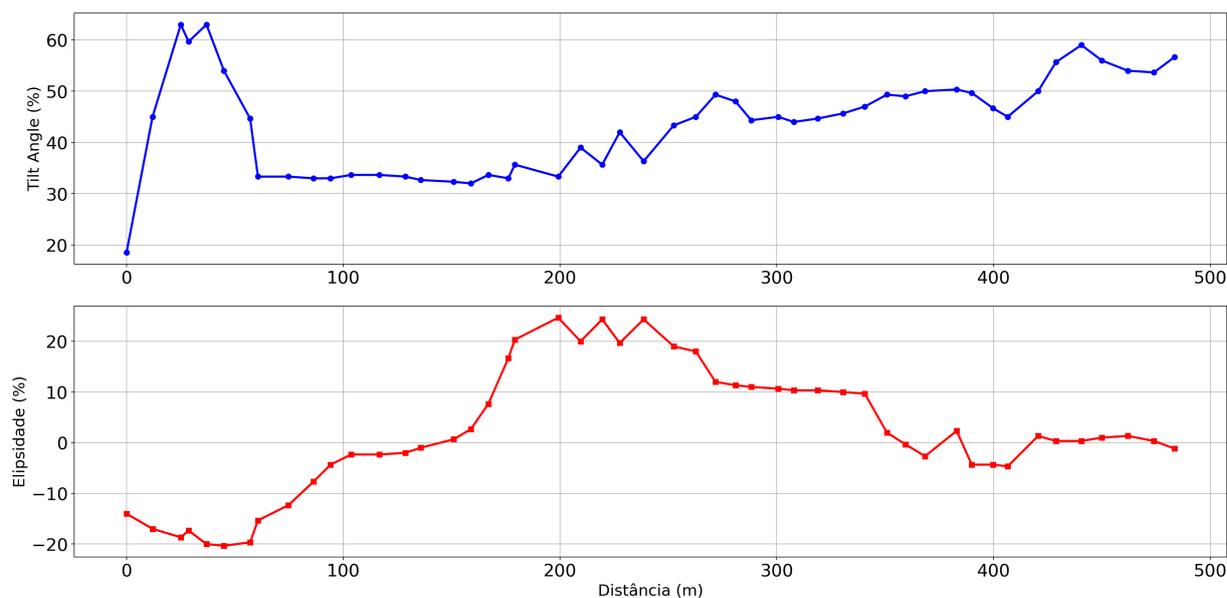


Figura A.4: Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 1 no Aterro Metropolitano Centro. Frequência de  $24kHz$ .

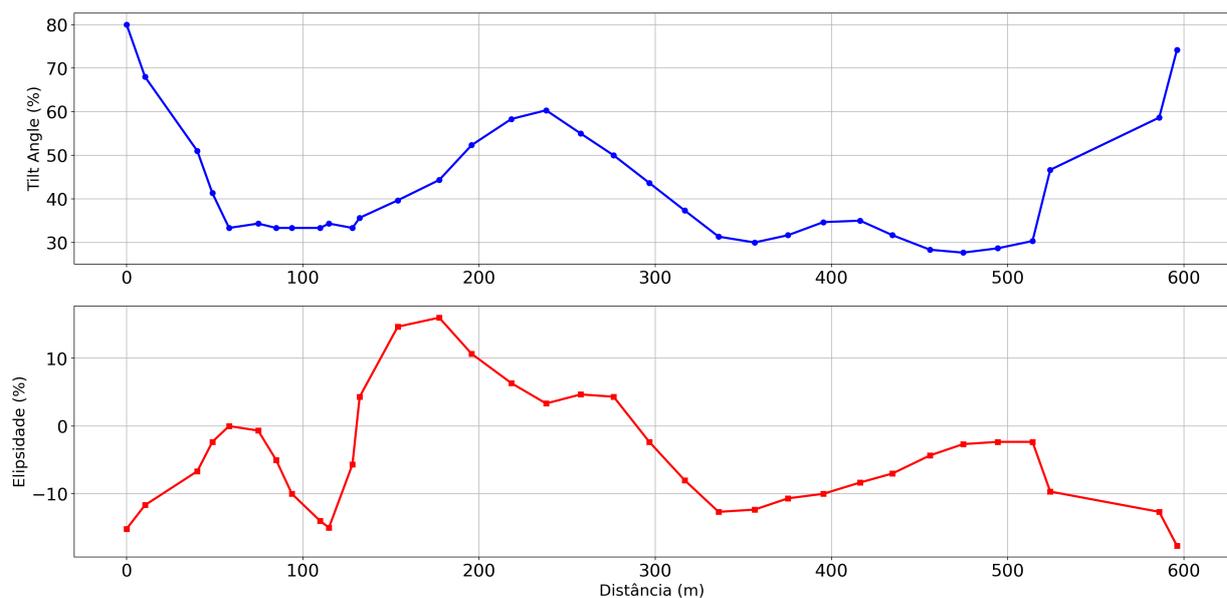


Figura A.5: Dados Brutos de Tilt Angle e elipsidade adquiridos ao longo da Linha 2 no Aterro Metropolitano Centro. Frequência de  $24kHz$ .

## A.1 Perfis de GPR

Aqui são apresentados os dados brutos de GPR, coletados com antena de 200 MHz.

### A.1.1 Perfis de GPR do Aterro Saitário de Camaçari

Perfis de dados brutos de GPR resultantes do levantamento realizado no Aterro de Camaçari, mostrados nas Figuras A.6, A.7, A.8, A.9, A.10, A.11, A.12 e A.13.

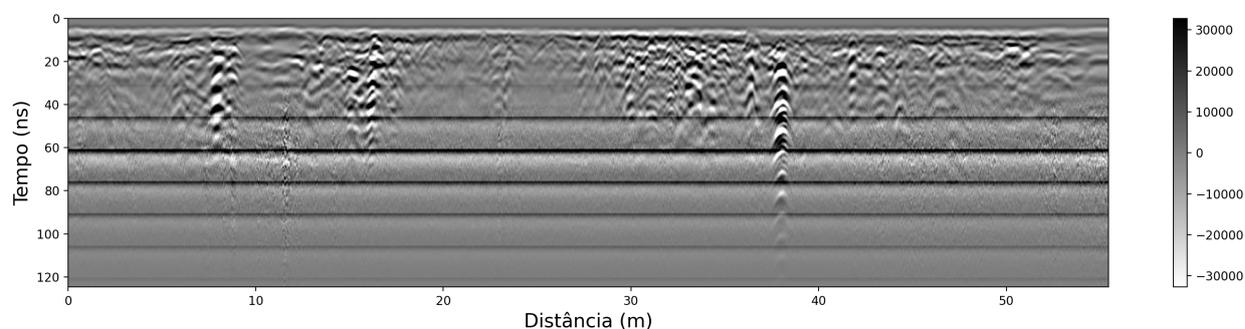


Figura A.6: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 1.

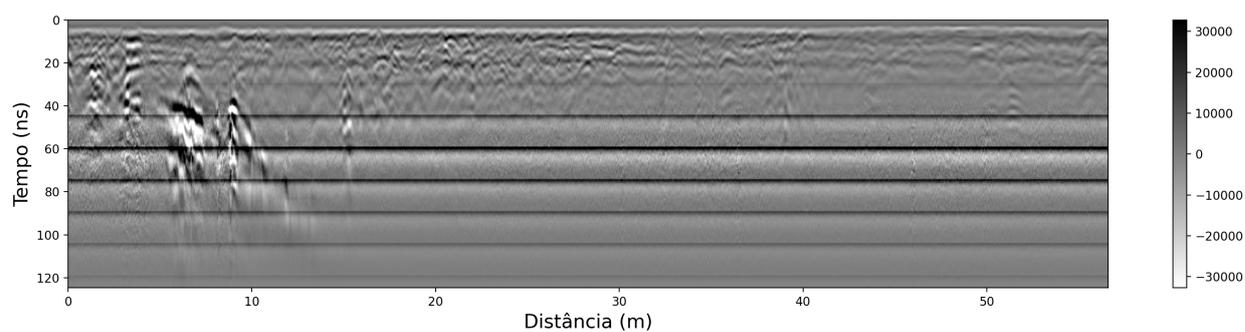


Figura A.7: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 2.

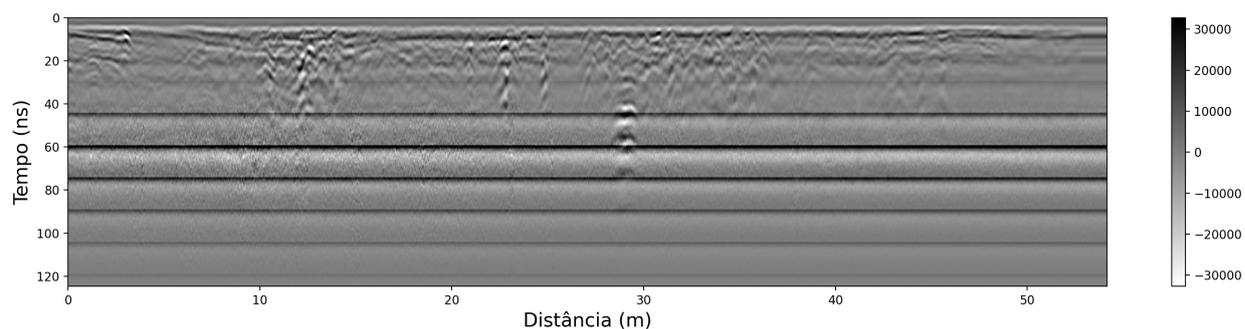


Figura A.8: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito no Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 3.

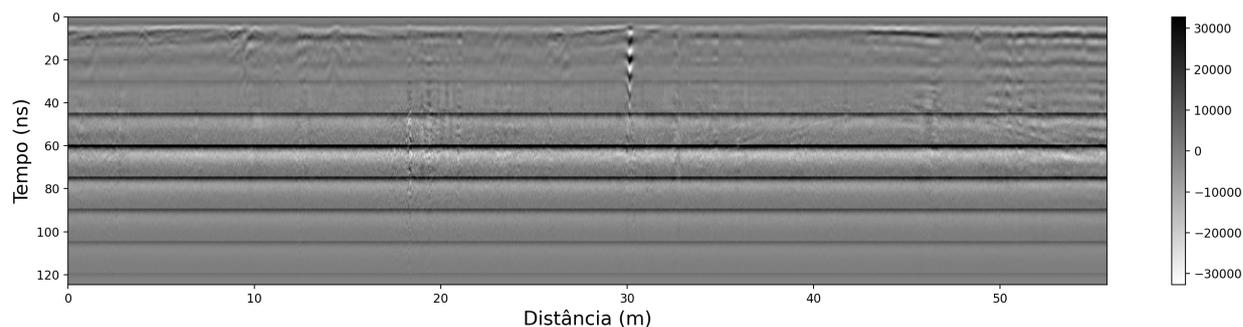


Figura A.9: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 4.

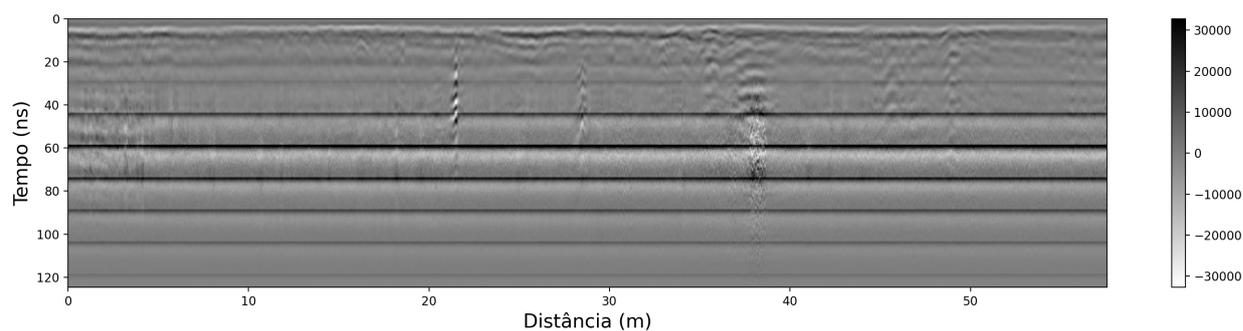


Figura A.10: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 5.

### A.1.2 Perfis de GPR do Aterro Sanitário Metropolitano Centro

Perfis de dados brutos de GPR resultantes do levantamento realizado no Aterro de Camaçari, mostrados nas Figuras A.14, A.15, A.16.

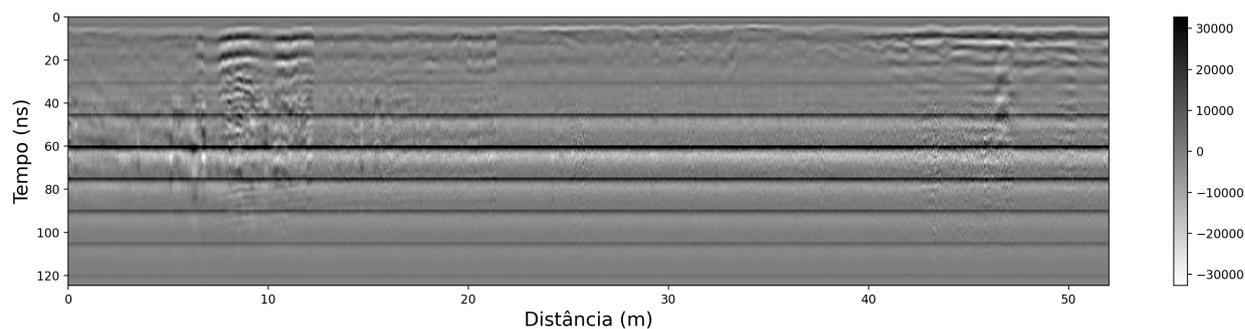


Figura A.11: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 6.

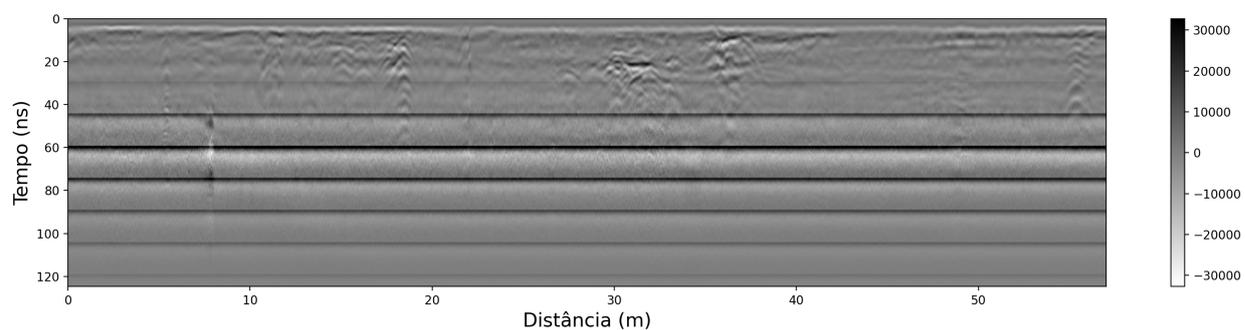


Figura A.12: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 7.

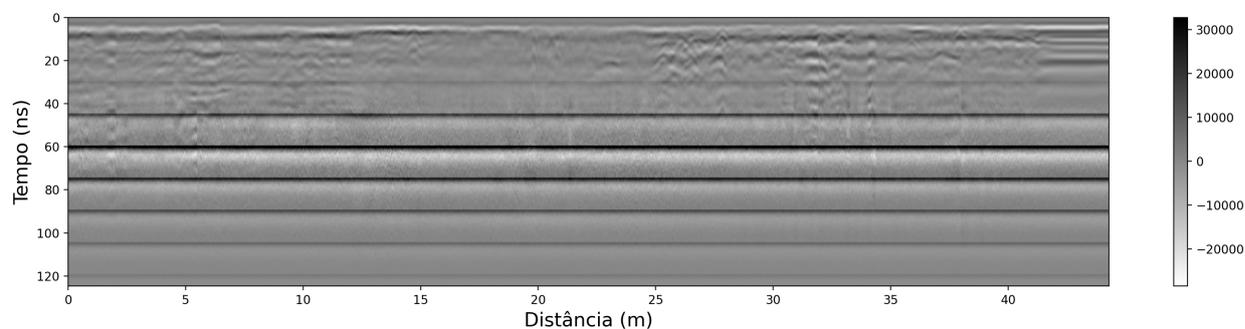


Figura A.13: Dado bruto de GPR do Perfil 03 feito Aterro Metropolitano Centro, referente ao trecho 8.

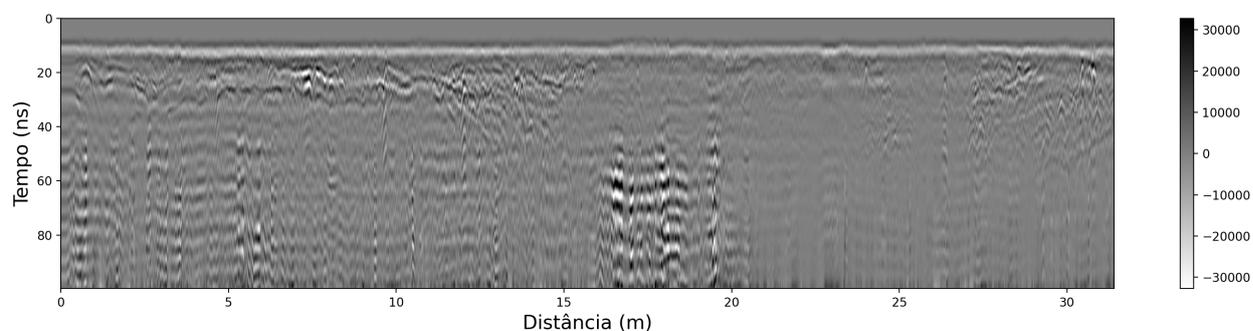


Figura A.14: Dado bruto de GPR do Perfil CC' feito no Aterro Metropolitano Centro.

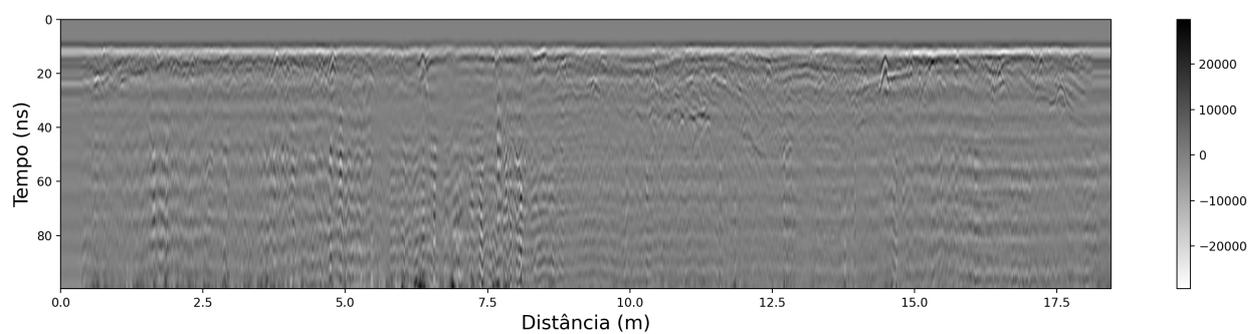


Figura A.15: Dado bruto de GPR do Perfil DD' feito no Aterro Metropolitano Centro.

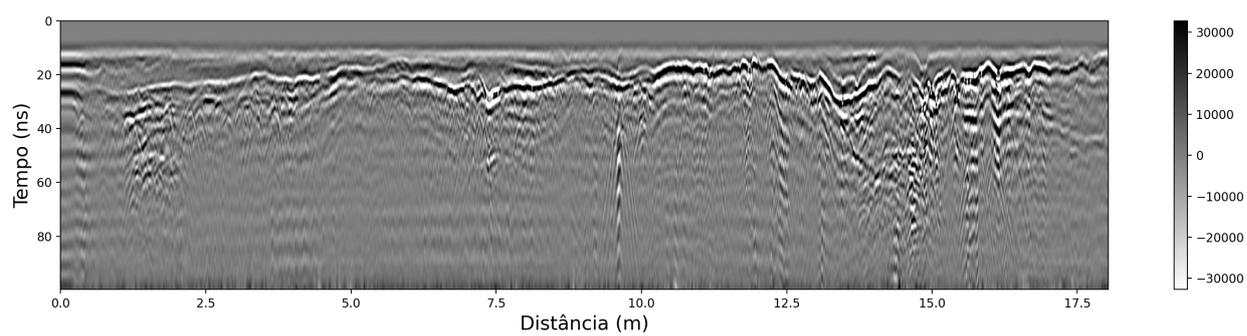


Figura A.16: Dado bruto de GPR do Perfil EE' feito no Aterro Metropolitano Centro.

# Referências Bibliográficas

- ABNT (1992) NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- ABNT (2004) NBR 10004: Resíduos sólidos—classificação, Associação Brasileira de Normas Técnicas.
- Annan, A. e Cosway, S. (1992) Simplified gpr beam model for survey design, In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts 1992*, pp. 356–359, Society of Exploration Geophysicists.
- Barbosa, J. e Dominguez, J. (1996) Mapa geológico do estado da bahia, Escala, **1**(1.00):000.
- BATTRE (2024) Quem somos, <https://www.battre.com.br/>.
- Boscov, M. E. G. (2008) Geotecnia ambiental, Oficina de textos.
- Braga, A. C. d. O. (2006) Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: uma abordagem metodológica e prática, Repositório UNESP.
- Cavalcanti, S. S. (1999) Hidrogeologia Subterrânea na Área do Aterro Sanitário de Salvador Usando Métodos Geofísicos Elétricos, Mestrado em ciências em geofísica, Universidade Federal da Bahia, Salvador/BA.
- Cavalcanti, S. S.; Sato, H. K. e Lima, O. A. (2001) Geofísica elétrica na caracterização da hidrologia subterrânea na região do aterro metropolitano centro, salvador, bahia, *Revista Brasileira de Geofísica*, **19**:155–168.
- Conceição, T. (2010) Modelagem vlf-em aplicada à interpretação da relação de contato entre a bacia de camamu e seu embasamento adjacente na região de valença, Bahia, Trabalho de graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Constable, S. C.; Parker, R. L. e Constable, C. G. (1987) Occam’s inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data, *Geophysics*, **52**(3):289–300.
- COSTA, E. S. L. (2006) Desg: Uma nova metodologia para inversao e coleta de dados magnetotelúricos. doctor thesis on geophysics—universidade federal do pará, brazil. 183

- pp. chave ad & jones ag. 2012. the magnetotelluric method. theory and practice.
- Davis, J. L. e Annan, A. P. (1989) Ground-penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy 1, *Geophysical prospecting*, **37**(5):531–551.
- Farias, V. J. C. (1996) Aplicação dos métodos eletromagnéticos VLF e HLEM na prospecção hidrogeológica no município de São Domingos do Araguaia-PA, Mestrado em ciências na Área de geofísica, Universidade Federal do Pará, Belém/PA.
- Filho, O. M. (2011) O projeto executivo do aterro metropolitano centro. in: Em pauta: Resíduos sólidos e sua destinação final., Rel. Téc., Companhia de Desenvolvimento Urbano do Estado da Bahia - CONDER-Salvador/BA.
- Fraser, D. (1969) Contouring of vlf-em data, *Geophysics*, **34**(6):958–967.
- Gallas, J. D. F.; Taioli, F.; Silva, S. M. C. P. d.; Coelho, O. G. W. e Paim, P. S. G. (2005) Contaminação por chorume e sua detecção por resistividade, *Revista Brasileira de Geofísica*, **23**:51–59.
- Gandolfo, O. C. B. (2007) Um estudo do imageamento geoeletrico na investigação rasa.
- Ghignone, J. I. (1979) Geologia dos sedimentos fanerozóicos do estado da bahia, *Geologia e Recursos Minerais do Estado da Bahia, Textos Básicos, SME/COM, Salvador*, **1**:23–117.
- Gonçalves, J. T. D. (2016) Utilização do método de eletrorresistividade para mapear agentes causadores de instabilidade de taludes no campus da ufba, Trabalho de Conclusão de Curso (Geofísica), Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA, Brasil.
- GSSI Geophysical Survey Systems, Inc (2024) Gssi - sir 4000 manual.
- Helene, L. P. I. e Moreira, C. A. (2021) Geofísica aplicada no monitoramento de aquífero fraturado contaminado por chorume, *Águas Subterrâneas*.
- IPT/CEMPRE (2000) Lixo municipal: Manual de gerenciamento integrado, Publicação IPT–Instituto de Pesquisa Tecnológicas, S. Paulo.
- Karous, M. e Hjelt, S. (1983) Linear filtering of vlf dip-angle measurements, *Geophysical prospecting*, **31**(5):782–794.
- Lago, A. L.; Elis, V. R. e Giacheti, H. L. (2006) Aplicação integrada de métodos geofísicos em uma área de disposição de resíduos sólidos urbanos em bauru-sp, *Revista Brasileira de Geofísica*, **24**:357–374.
- Laureano, A. T. (2007) Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT, Tese de Doutorado, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Física e Meio Ambiente ?

- Leão, C. A. d. S. (2019) Delimitação geolétrica e modelagem lagrangiana da pluma de contaminação do aterro sanitário de camaçari, Trabalho de Conclusão de Curso (Geofísica), Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA, Brasil.
- Lima, O. (1999) Caracterização hidráulica e padrões de poluição no aquífero recôncavo na região de camaçari-dias d'ávila, Unpublished full professor thesis]. Universidade Federal da Bahia (in Portuguese).
- Lowrie, W. e Fichtner, A. (2020) Fundamentals of geophysics, Cambridge university press.
- Magnavita, L. P. (1992) Geometry and kinematics of the Reconcavo-Tucano-Jatoba Rift, NE Brazil., Tese de Doutorado, University of Oxford.
- Magnavita, L. P.; Szatmari, P.; Cupertino, J. A.; Destro, N. e Roberts, D. (2012) The recôncavo basin, Regional Geology and Tectonics: Phanerozoic Rift Systems and Sedimentary Basins, **1**:383.
- Malagutti Filho, W.; José, C.; Braga, A. C. O.; Elis, V. R.; Tandel, R. Y. e Porsani, J. L. (1997) Aplicação integrada de técnicas geofísicas no aterro sanitário de rio claro-sp-resultados preliminares, In: *5th International Congress of the Brazilian Geophysical Society*, pp. cp-299, European Association of Geoscientists & Engineers.
- Marquardt, D. W. (1963) An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *Journal of the society for Industrial and Applied Mathematics*, **11**(2):431-441.
- McNeill, J. e Labson, V. (1988) Electromagnetic theory for geophysical applications, In: *Electromagnetic methods in applied geophysics: Voume 2, Application, Parts A and B*, pp. 521-637, Society of Exploration Geophysicists, Netherlands.
- Meneses, A. d. S. (2010) Estudo teórico de atributos sísmicos em dados sísmicos de reflexão, Universidade Federal da Bahia.
- Milhomem, P.; Maman, E.; Oliveira, F.; Carvalho, M. e Lima, W. (2003) Bacias sedimentares brasileiras: Bacia do recôncavo, *Fundação Paleontológica Phoenix*, **5**(51).
- Milsom, J. e Eriksen, A. (2013) Field geophysics.
- Moraes, L.; Torres, L. e Dias, G. (1995) Recursos hídricos, saneamento e saúde, *Planejamento Ambiental para Salvador-Documents Preliminares*, pp. 139-226.
- Moreira, C. A.; Braga, A. C. d. O.; Godoy, L. H. e Sardinha, D. d. S. (2013) Relationship between age of waste and natural electric potential generation in sanitary landfill, *Geofísica internacional*, **52**(4):375-383.
- Moreira, C. A.; Munhoz, T.; Cavallari, F. e Helene, L. P. I. (2015) Electrical resistivity to detect zones of biogas accumulation in a landfill, *Geofísica internacional*, **54**(4):353-362.

- Naturalle (2024) Ctvr: Camaçari-ba, url[https://naturalleresiduos.com.br/servicos/tratamento\\_de\\_residuos/ctvr/camacari-ba](https://naturalleresiduos.com.br/servicos/tratamento_de_residuos/ctvr/camacari-ba).
- Pařteka, R. e Kuřnirák, D. (2020) Role of euler deconvolution in near surface gravity and magnetic applications, *Advances in modeling and interpretation in near surface geophysics*, pp. 223–262.
- Paterson, N. R. e Ronka, V. (1971) Five years of surveying with the very low frequency?electro magnetics method, *Geoexploration*, **9**(1):7–26.
- Penteado, H. (1999) Modelação Composicional 2D da Gênese, Expulsão e Migração do Petróleo no Compartimento sul da Bacia do Recôncavo, Brasil, Tese de Doutorado, PhD Thesis, l'Université Pierre et Marie Curie, Paris.
- Pereira, P. d. A. e Lima, O. A. L. d. (2018) Estrutura elétrica da contaminação hídrica provocada por fluidos provenientes dos depósitos de lixo urbano e de um curtume no município de alagoinhas, bahia, *Brazilian Journal of Geophysics*, **25**(1):5–19.
- Pinto, M. V. (2007) Imageamento de depósitos sedimentares análogos a reservatórios de hidrocarbonetos da bacia do recôncavo utilizando o gpr, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.
- Porciúncula, R. d. J. (2021) Hidrogeofísica e resíduos sólidos urbanos: estudos de casos em aterros sanitários na porção sul do sistema aquífero são sebastião, rms/ba, Dissertação de Mestrado (Geologia), Universidade Federal da Bahia, Salvador - BA, Brasil.
- Reid, A.; FitzGerald, D. e McInerny, P. (2003) Euler deconvolution of gravity data, In: *SEG International Exposition and Annual Meeting*, pp. SEG–2003, SEG.
- Reynolds, J. M. (2011) *An introduction to applied and environmental geophysics*, John Wiley & Sons.
- Sato, H. K. (1999) Notas de aula do curso de métodos geofísicos elétricos.
- Sato, H. K. (2002) Notas de aula: Métodos elétricos.
- Saydam, A. S. (1981) Very low-frequency electromagnetic interpretation using tilt angle and ellipticity measurements, *Geophysics*, **46**(11):1594–1605.
- da Silva, O. B.; da Cruz Cunha, P. R. e Gonçalves de Melo, J. (2007) Bacia do recôncavo, *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, **15**:423–431.
- Silva, O. d.; Caixeta, J.; Milhomem, P. d. S. e Kosin, M. (2007) Bacia do recôncavo, *Boletim de Geociências da PETROBRAS*, **15**(19):423–433.
- Silva, P. U. C. (2019) Aplicação de processamento de dados gpr e atributos de onda para o estudo do diápiro de folhelho de santa maria, candeias - ba., unpublished.

- Smith, B. D. e Ward, S. H. (1974) On the computation of polarization ellipse parameters, *Geophysics*, **39**(6):867–869.
- Souza, M. A. (2016) Impactos socioambientais no entorno do aterro metropolitano centro, salvador-bahia, Repositório UFBA.
- Stevanato, R.; Ferreira, F. J. F.; Wosniak, R. e Simioni, M. T. S. (2004) Mapeamento de pluma de contaminação no aterro sanitário de coronel vivida-pr, In: *I Simpósio Brasileiro de Geofísica*, pp. cp–216, European Association of Geoscientists & Engineers.
- Sungkono; Santosa, B. J.; Bahri, A. S.; Santos, F. M. e Iswahyudi, A. (2017) Application of noise-assisted multivariate empirical mode decomposition in vlf-em data to identify underground river, *Advances in Data Science and Adaptive Analysis*, **9**(01):1650011.
- Telford, W. M.; Telford, W.; Geldart, L. e Sheriff, R. E. (1990) *Applied geophysics*, Cambridge university press.
- Thompson, D. (1982) Euldph: A new technique for making computer-assisted depth estimates from magnetic data, *Geophysics*, **47**(1):31–37.
- Vasconcelos, S. e Santos, B. (2023) Proposta de implementação de metodologia geofísica como parte do protocolo de instalação/expansão de aterros para a proteção de águas subterrâneas: Proteção de águas subterrâneas, *Cadernos de Geociências*, **18**(especial).
- Ward, S. (1990) Resistivity and induced polarization methods geotechnical and environment-geophysics, *Society Exploration Geophysics*, **1**.
- Ward, S. H. e Hohmann, G. W. (1988) Electromagnetic theory for geophysical applications, In: *Electromagnetic methods in applied geophysics: Voume 1, theory*, pp. 130–311, Society of Exploration Geophysicists, Netherlands.
- Zhang, Z. (2015) The geophysical very low frequency electromagnetic (VLF-EM) method: effects of topography and surface water investigated with simulations and field measurement, Tese de Doutorado, University of Saskatchewan.
- Zhdanov, M. S. e Keller, G. V. (1994) The geoelectrical methods in geophysical exploration, *Methods in geochemistry and geophysics*, **31**.