UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CURSO DE GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

IMAGEAMENTO GEOELÉTRICO NA ÁREA DO ATERRO METROPOLITANO CENTRO PARA IMPLANTAÇÃO DE NOVOS POÇOS DE MONITORAMENTO E PRODUÇÃO

IAN DE GRISI LAPA

SALVADOR – BAHIA

FEVEREIRO – 2018

Imageamento Geoelétrico na Área do Aterro Metropolitano Centro para Implantação de Novos Poços de Monitoramento e Produção

por

Ian de Grisi Lapa

Orientadora: Profa. Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

GEO213 – TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Departamento de Geofísica

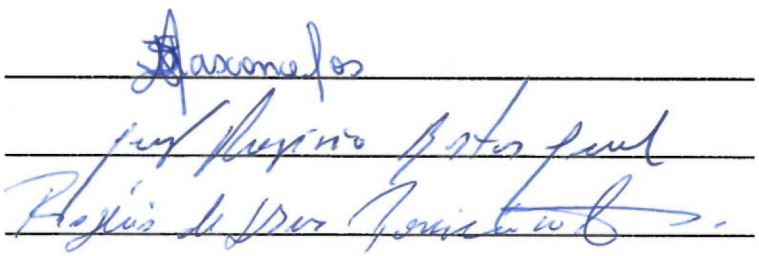
do

Instituto de Geociências

da

Universidade Federal da Bahia

Comissão Examinadora



Dra. Suzan Sousa de Vasconcelos

Dr. Luiz Rogério Bastos Leal

MC. Rogério de Jesus Porciúncula

Data da aprovação: 26/02/2018

Dedico à vida.

Resumo

O estudo geofísico na região do Aterro Sanitário Metropolitano Centro - Salvador, Bahia, foi feito através de imageamento geoelétrico, bem como com a utilização de modelos matemáticos feitos a partir das medidas de resistividade aparente obtidas em campo. O método eletrorresistivo é um método geofísico aplicável a estudos rasos, baseando-se em contrastes resistivos da subsuperfície resultantes tanto de aspectos geológicos da área como de alterações químicas e/ou físicas por intemperismo, metamorfismo ou ainda deposição de resíduos por ação antropogênica. Neste trabalho, o objetivo geral através da utilização deste método é obter informações para alocação de 3 poços de monitoramento, que tem como finalidade a realização de amostragens periódicas de água do aquífero que subjaz o aterro e um poço de produção para beneficiamento da água subterrânea. Os ensaios foram realizados utilizando o arranjo de eletrodos Dipolo-Dipolo em 5 linhas perfiladas à jusante do empreendimento. Os dados foram processados no software comercial ZondRes2D para possibilitar a interpretação, resultando em seções de resistividade elétrica que foram interpretadas para se fazer a alocação dos poços. Com isso, foi possível identificar pacotes mais espessos de rocha saturada com menor cobertura e sugerir 6 possíveis locais para instalação dos poços, dentre os quais poderão se escolher 3, levando em consideração outros aspectos que não cabem neste trabalho, como custos, planejamento de uso da área, entre outros.

Abstract

The study of the sanitary landfill of the Metropolitan Region of Salvador was done through non-invasive eletroresistive imaging, as well as the use of mathematical models made from the field measurements obtained. The electroresistivity method is a geophysical technique applicable to shallow studies, which shows resistive contrasts in subsurface that are resulting both from the area geology itself and from chemical changes due to weathering, metamorphism or still deposition of residues by anthropogenic action. In this work, the general objective by using this method is to obtain information for the allocation of 3 monitoring wells, with the purpose of continuous observations of water samples of the existing aquifer in the landfill, using the Dipole-Dipole electrode arrangement in the realization of 5 Electrical Resistivity Tomography passing through various landfill sites. The data were processed in the comercial software ZondRes2D to enable interpretation, resulting in the profiles of electroresistivity that were interpreted to make the geological mapping and geophysical characterization of the area. With this, it was possible to identify thicker packages of saturated rock with less coverage and to suggest 6 possible locations for the installation of wells, among which 3 could be chosen, taking into account other aspects that do not fit in this work, such as costs, use planning of the area, among others.

Sumário

Resumo **3**

Abstract **4**

Introdução **10**

1 Caracterização da Região de Estudo **12**
1.1 Área de Estudo 12
1.2 Geologia 13
1.2.1 Formação Barreiras 13
1.2.2 Depósitos Alúvio-Coluvionares 14
1.2.3 Substrato Rochoso 15
1.3 Hidrologia 15
1.3.1 Propriedades Hidráulicas das Rochas 15
1.4 Aquíferos 17

2 Metodologia **20**
2.1 Resistividade Elétrica das Rochas 20
2.2 Método Eletrorresistivo 21
2.2.1 Lei de Ohm e Conservação da Carga Elétrica 22
2.2.2 Potencial Elétrico em Meio Homogêneo e Resistividade Aparente . . . 23
2.2.3 Arranjo de Eletrodos 24
2.2.4 Caminhamento Elétrico 25
2.2.5 Inversão Bidimensional de Dados e ZondRes2D 26

3 Aquisição, Tratamento e Interpretação dos Dados Geoelétricos **27**
3.1 Aquisição dos dados 27
3.2 Tratamento dos dados 28
3.3 Interpretação dos dados 30
3.3.1 Linha da Cia Aeroporto 30

3.3.2 Linha do Horto 31
3.3.3 Linha das Bacias de Chorume 33
3.3.4 Linha da Pista Interna 34
3.3.5 Linha do Centro de Podas 36

4 Conclusões **38**

Agradecimentos **39**

Referências **41**

Lista de Tabelas

2.1 Intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de rochas (Extraído de Novais (2014)) 21

Lista de Figuras

1.1 Aterro Sanitário Metropolitano Centro (Fonte: Google Earth). 12
1.2 Mapa de localização da área de estudo na Região Metropolitana de Salvador com a geologia (Fonte: Hidrologia subterrânea na área do aterro sanitário de Salvador usando métodos geofísicos elétricos (Cavalcanti, 1999) 14
1.3 Experimento de Darcy (Porciúncula e Lima, 2009) 17

2.1 Disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e dos eletrodos de potencial (M e N) no arranjo Dipolo-Dipolo (retirado de (Amarante, 2014) 24
2.2 Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo Dipolo-Dipolo (Braga, 2016) 25

3.1 a) em linha vermelha contínua: La - Linha d Cia Aeroporto, Lb - Linha do Horto, Lc - Linha das Bacias de Chorume, Ld - Linha da Pista Interna, Le - Linha do Centro de Podas; b) em linha pontilhada branca delimitação do aterro. 28
3.2 Fotos da aquisição: em sentido horário A) carretéis de fios na linha da CIA-Aeroporto, B) equipamento *SYSCAL R2* utilizado, C) instalação de eletrodo em bambuzal, D) medição de linha em bambuzal 29
3.3 Tela do software ZondRes2D com linha invertida ao fundo e janela de edição de parâmetros sobreposta. 29
3.4 Inversão da Linha Cia Aeroporto, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno. 30
3.5 Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento. . 31
3.6 Inversão da Linha do Horto, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno. 32
3.7 Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento. . 32

3.8 Inversão da Linha paralela às Bacias de Chorume, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno. 33
3.9 Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento. . 34
3.10 Inversão da Linha da Pista Interna, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno. 35
3.11 Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento. . 36
3.12 Inversão da Linha do Centro de Podas, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno. 36
3.13 Seção de resistividade verdadeira interpretada. 37

Introdução

A Região Metropolitana de Salvador (RMS), também conhecida como Grande Salvador, possui pouco mais de 4 milhões de habitantes e é a segunda maior aglomeração urbana do Nordeste. Engloba, além do município de Salvador, Camaçari, Lauro de Freitas e Simões Filho (Fonte: IBGE). Localizado na estrada CIA-Aeroporto, o aterro sanitário que protagoniza o cerne deste trabalho, chamado de Aterro Metropolitano Centro (AMC), é de propriedade da Prefeitura Municipal de Salvador, sendo administrado, por concessão, pela Empresa de Transferência e Tratamento de Resíduos (BATTRE). O aterro e consequentemente parte do aquífero situado nele se encontram na Bacia Hidrográfica do Rio Joanes (Marchi, 2011).

Sabe-se que uma parcela considerável da população mundial ainda não tem acesso à água potável, o que pode ocasionar diversos problemas de saúde pública. A água é indispensável no modo de vida da humanidade também no que se refere a produção, seja essa de caráter artesanal, industrial ou ainda na agricultura e pecuária de subsidência e grande escala, de forma que está fortemente ligada à cultura de todos os povos da Terra. Diante dos problemas advindos do mau uso dos recursos hídricos, surge uma nova consciência de que é necessário utilizar a água racionalmente. Portanto, é de suma importância o estudo de aquíferos em regiões onde há riscos de contaminação, a fim de prever ou minimizar qualquer tipo de resíduo presente que possa vir a comprometer a qualidade deste bem.

A utilização do método geofísico de eletrorresistividade é, invariavelmente, uma boa alternativa para caracterização hidrogeológica de aquíferos fraturados, considerando resolução, custo e rapidez (Braga, 2016). Os contrastes geoelétricos identificados, ao serem analisados, juntamente com informações geológicas previamente conhecidas e principalmente com ação antropogênica, nos permite inferir importantes informações em relação a situação do aquífero, como confinantes, bases permeáveis, espessuras e profundidades (Feitosa e Filho, 1997).

Para o estudo da área do aterro, foram realizados 5 perfis geoelétricos, com linhas variando entre 160 e 690 metros de extensão, a fim de caracterizar o aquífero subterrâneo e identificar posições favoráveis à alocação de 3 poços de monitoramento e de produção que serão utilizados continuamente para controle da qualidade da água através de análise hidroquímica e extração de água, respectivamente. O monitoramento dos poços faz parte

do projeto *Avaliação hidrogeoquímica e da qualidade de águas superficiais e subterrâneas na área do Aterro Metropolitano Centro (AMC), Salvador, Bahia* do Núcleo de Estudos Hidrogeológicos e do Meio Ambiente da Universidade Federal da Bahia (NEHMA-UFBA). Como subproduto, as imagens das seções de resistividade elétrica serviram para avaliar a ocorrência de contaminação local.

Capítulo 1

Caracterização da Região de Estudo

1.1 Área de Estudo

O Aterro Metropolitano Centro (Figura 1.1) é tido hoje como um dos mais eficientes destinos finais dos resíduos no país e tem validade para operar até 2020. Localiza-se na bacia hidrográfica do Rio Joanes, precisamente na Região Metropolitana de Salvador (RMS), à margem direita da rodovia BA-526, no sentido CIA-Aeroporto, próximo a interseção desta com a Via Parafuso (Cavalcanti, 1999).

Figura 1.1: Aterro Sanitário Metropolitano Centro (Fonte: Google Earth).

1.2 Geologia

A grande Salvador pode ser subdividida em três domínios geológicos, que compreendem a Bacia sedimentar do Recôncavo, a Margem Costeira Atlântica e o Alto Salvador. A Bacia do Recôncavo faz parte do Sistema Recôncavo-Tucano Jatobá, limitando-se a Leste pela Falha de Salvador; acumulações pouco espessas de sedimentos argilosos, arenosos e areno-argilosos constituem a Margem Costeira atlântica, enquanto que o Alto Salvador por sua vez é um *horst* de rochas metamórficas de alto grau e que separa a Bacia do Recôncavo do Oceano Atlântico (Barbosa et al., 2005).

A zona aquífera principal é representada por arenitos da Formação Barreiras e pelo embasamento alterado (Figura 1.2). São identificados quatro domínios com características geológico-geotécnicas próprias: (i) Depósitos Arenosos Inconsolidados, que ocorre em pequena porção da área e possuem alta permeabilidade e porosidade; (ii) Depósitos Alúvio-coluvionares, que se estende ao longo das drenagens que cortam a área do aterro e possuem pouca espessura e alto teor de umidade, devido à sua proximidade com o lençol freático; (iii) Coberturas Terciárias, que se apresentam nas porções mais elevadas da área e se constitui por conjunto de camadas arenosas e argilosas do Grupo Barreiras e, (iv) Substrato Rochoso Alterado, onde as rochas do embasamento cristalino sofreram intenso processo de fragmentação, transformando-se em um manto de material alterado, que atinge mais de vinte metros de espessura (Marchi, 2011).

A Figura 1.2 mostra o complexo litológico no qual a Região Metropolitana de Salvador está inserida. Estruturas de cobertura terciária se assentam na forma de discordâncias sobre as rochas mais antigas e por sedimentos quaternários marinhos e aluviais. Além disso, também há rochas do embasamento cristalino Pré-Cambriano e sedimentos Jurássico-Cretáceo da bacia sedimentar do Recôncavo. Este último possui o seu pacote sobreposto a um substrato de rochas ígneas e metamórficas delimitado por duas grandes falhas: a Falha de Salvador, a leste, e a Falha de Maragogipe, a oeste (BAHIA, 1992). Como última descrição, há também na região metropolitana a Formação Barreiras e os depósitos alúvio-coluvionares.

1.2.1 Formação Barreiras

A Formação Barreiras é uma formação geológica de idade terciário-quaternária que se distribui pela costa brasileira desde o estado do Amapá até o Rio de Janeiro (Souza, 1987). A formação cobre boa parte da RMS numa espessura média de 50 metros, e tradicionalmente tem sido interpretada como uma cobertura sedimentar resultante da deposição em sistemas aluviais, ocupando por sua vez quase todo o terciário baiano. Abrange sedimentos continentais pouco litificados, tendo os seus sedimentos sendo constituintes de testemunhos de leques

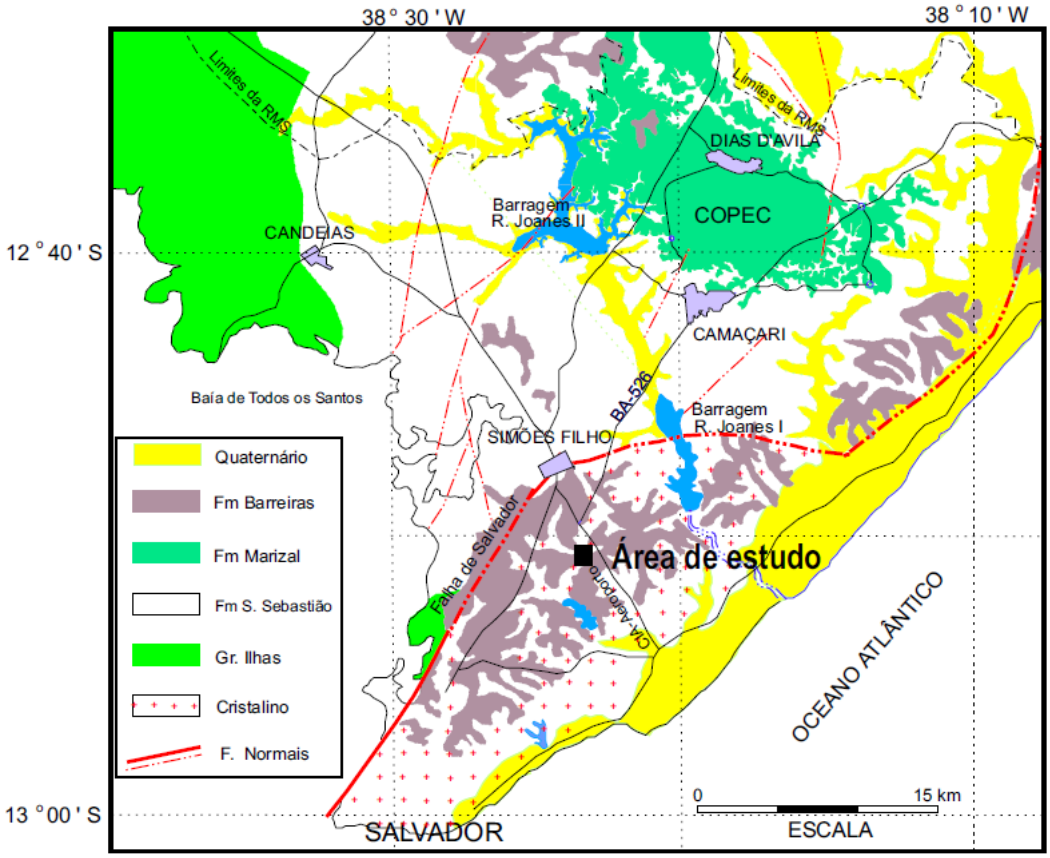


Figura 1.2: Mapa de localização da área de estudo na Região Metropolitana de Salvador com a geologia (Fonte: Hidrologia subterrânea na área do aterro sanitário de Salvador usando métodos geofísicos elétricos (Cavalcanti, 1999)

aluviais pliocênicos depositados discordantemente sobre o embasamento cristalino. Além disso, outra característica notável da Formação Barreiras é sua morfologia tabular inclinada em direção à costa. Os depósitos arenosos presentes na formação ocorrem numa pequena porção da área, são inconsolidados e notoriamente possuem alta permeabilidade e porosidade. Os arenitos são descritos como grosseiros, com grão subangulares e arrendados de má seleção. Nesses pacotes de areia encontra-se a maior parte da água subterrânea presente na região (Cavalcanti, 1999; Marchi, 2011).

1.2.2 Depósitos Alúvio-Coluvionares

Os depósitos alúvio-coluvionares constituem-se de sedimentos areno-argilosos depositados durante as secas ou nos locais de remansos quando se cai a energia da corrente do rio, ou seja, são bastante modificados pela erosão fluvial. No âmbito do trabalho, as unidades geológicas erodidas que originam tais sedimentos são rochas do embasamento cristalino ou

da Formação Barreiras, sendo os depósitos diferenciados pela fonte e os vales existentes na área do aterro capeados por estes sedimentos. São compostos na região por areias brancas de má seleção que contém seixos de grãos arredondados e angulosos (Cavalcanti, 1999).

1.2.3 Substrato Rochoso

O substrato rochoso da região estudada é representado pelo embasamento cristalino e suas rochas granulíticas. Tais rochas estão cobertas geralmente por sedimentos terciários da Formação Barreiras, sedimentos recentes ou por um extenso manto de alteração de mais de vinte metros de espessura, o que por muitas vezes faz com que os maiores afloramentos sejam encontrados nos fundos dos vales (Cavalcanti, 1999). Além disso, muitos afloramentos ocorrem ao longo da orla marítima de Salvador e também em regiões altas da Bacia do Rio Itinga, onde por sua vez encontram-se empresas de exploração de rochas, como as pedreiras Aratu e Caragi (Duarte, 2016).

1.3 Hidrologia

O aterro situa-se na micro-bacia do Rio Itinga, integrante da sub-bacia do rio Ipitanga, principal tributário do rio Joanes, o qual deságua no Oceano Atlântico e faz a divisa entre os municípios de Lauro de Freitas e Camaçari. Todas essas bacias servem para abastecimento de Salvador e região metropolitana. A bacia do rio Joanes abrange uma área de aproximadamente $650km^2$, envolvendo diversos municípios, dentre eles: Salvador, Lauro de Freitas e Simões Filho. A bacia do rio Ipitanga é de médio porte, tem formato aproximadamente circular o que proporciona grande influência para o escoamento hídrico. Responsável por parte do abastecimento de água da cidade de Salvador, suas nascentes brotam em sitio cristalino, na fazenda Santa Terezinha, município de Simões Filho, acima do Centro Industrial de Aratu (CIA) e o mesmo deságua no rio Joanes em Lauro de Freitas (Cavalcanti, 1999; Duarte, 2016).

1.3.1 Propriedades Hidráulicas das Rochas

A hidráulica é o campo da Física que disserta sobre o comportamento dos fluidos em movimentos e em repouso. O estudo de propriedades hidráulicas das rochas é de suma importância em trabalhos hidrológicos, uma vez que tais propriedades influenciam diretamente nas respostas aos métodos geofísicos que as formações geológicas tidas como reservatórios trazem.

Porosidade

A porosidade ϕ de uma rocha é um conceito simples porém de altíssima relevância quando se trata do estudo de unidades geológicas subterrâneas. De acordo com Feitosa e Filho (1997), nada mais é que a razão entre o volume de espaços vazios V_v e o volume total de uma rocha V_t, sendo comumente expressada em porcentagem:

$$\phi = \frac{\Delta V_v}{\Delta V_t} \times 100 \tag{1.1}$$

Em relação a formação dos poros, a porosidade se divide entre primária e secundária. O primeiro caso trata da porosidade que já veio do processo de formação da rocha, ocorrendo quase sempre em rochas sedimentares (exceção são rochas vulcânicas). O segundo caso vai representar a porosidade que surgiu devido a fissuras e fraturas mecânicas ou até mesmo dissolução de sais na rocha posteriores à sua formação.

Lei de Darcy e Potencial Piezométrico

Em 1856, o engenheiro hidráulico francês Henry Darcy propôs, experimentalmente, uma equação para descrever o fluxo de um fluido através de um meio poroso, sendo no caso do experimento o escoamento de água por um filtro de areia. Segundo Feitosa e Filho (1997), Darcy concluiu que a vazão Q (volume por unidade de tempo) do escoamento é dada matematicamente por:

$$Q = \frac{KA\,(h_1 - h_2)}{L}, \tag{1.2}$$

onde A é a seção transversal do filtro, L a distância entre os piezômetros (ou simplesmente tamanho do filtro) e K um coeficiente de proporcionalidade. Cabe aqui uma atenção maior ao termo $h_1 - h_2$, que representa a diferença entre as cargas piezométricas (ou cargas hidráulicas) nos pontos de escoamento. Ainda segundo Feitosa e Filho (1997), em termos práticos, essa diferença é o que fisicamente conhecemos como potencial piezométrico (ou potencial hidráulico). Para que ocorra fluxo de fluido, é necessário que haja diferença entre as cargas piezométricas h_1 e h_2, sendo que o fluxo fluirá sempre do ponto de maior carga para o de menor. Todo esse experimento em que Darcy se baseou pode ser conferido conforme o esquema Figura 1.3.

Permeabilidade

Na geologia, a permeabilidade é uma propriedade hidráulica definida como a habilidade ou capacidade de uma rocha permitir o fluxo de fluido através de seus poros. Pode ser obtida através de ensaios laboratoriais ou mesmo, de acordo com Batista (2007), através da Lei de

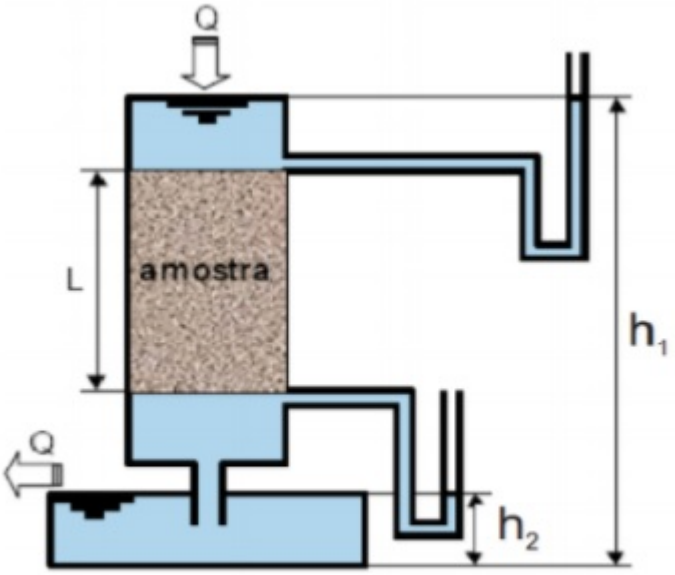


Figura 1.3: Experimento de Darcy (Porciúncula e Lima, 2009)

Darcy. Devido ao caráter dinâmico que associa o meio poroso com o fluido existente, a permeabilidade, segundo Feitosa e Filho (1997), é influenciada pela porosidade; tamanho, forma, arranjo e distribuição dos grãos; características do fluido que está escoando (viscosidade e massa específica) (Lima, 2014).

1.4 Aquíferos

Aquíferos são unidades geológicas permoporosas em que ocorre o armazenamento e transporte de água subterrânea. São de extrema importância para a humanidade, uma vez que, estando preservados adequadamente em relação a contaminação e seus próprios níveis, podem ser explorados a fim de abastecimento. Dentro de um aquífero, o nível freático é o nível em que se encontram as águas subterrâneas. Quanto mais alto, mais próximo da superfície as águas estão; quanto mais baixo, mais distantes se encontram. A seguir, algumas importantes classificações e informações sobre aquíferos relacionadas ao nível freático e outras características.

De acordo com Feitosa e Filho (1997), a presença de água subterrânea nos aquíferos é dividida verticalmente em duas zonas, quais sejam:

- **Zona Saturada**: Situada abaixo do nível freático e com todos os poros preenchidos por água.

- **Zona Insaturada ou Zona de Aeração**: Situada entre a superfície do terreno e o nível freático, o que resulta nos poros estarem preenchidos parcialmente por ar e água. Nesta zona temos três subdivisões:

  Zona Capilar: Estende-se do nível freático e termina na ascensão capilar da água. Devido a heterogeneidade do terreno e irregularidade no tamanho dos poros, muitas vezes próximo ao nível freático os poros encontram-se praticamente saturados, o que se faz adotar o conceito de franja capilar como um limite abaixo do qual o solo é praticamente saturado (aproximadamente 75%).

  Zona Intermediária: Estende-se do limite de capilaridade da água até o alcance das raízes das plantas. A umidade que ainda se faz presente é devido a água capilar isolada, ou seja, fora do alcance das raízes.

  Zona de Água no Solo ou Zona de Evapotranspiração: Situa-se entre os extremos radiculares da vegetação e a superfície do terreno. Por esse motivo, pode ter uma espessura mínima quando há pouca vegetação ou até metros em casos de vegetação abundante.

O aquífero, como já dito, é capaz de armazenar e transmitir água. Embora discutir sobre suas características seja o maior objetivo neste capítulo, na hidrogeologia ainda existem outras estruturas geológicas a se definir, sejam elas:

- **Aquiclude**: Formação que contém água mas não é capaz de transmiti-la entre seus poros.
- **Aquitardo**: Formação que contém água e é semipermeável, apresentando taxas baixíssimas de fluxo de água.
- **Aquifugo**: Formação impermeável que não consegue armazenar e nem portanto transmitir água.

Agora, classificações tratando somente dos aquíferos. De acordo com Santos (2010), os aquíferos podem ser classificados conforme a textura como:

- **Aquíferos Porosos**: Formações constituídas por rochas sedimentares consolidadas ou não, nas quais a água fica retida e circula entre os poros.
- **Aquíferos Cársticos**: São as unidades compostas por rochas carbonáticas, onde o processo de dissolução gera, como mencionado anteriormente, porosidade secundária, resultando em feições propícias ao armazenamento e transmissão de água.

- **Aquíferos Fissurais**: São unidades do embasamento cristalino (rochas ígneas e metamórficas) onde, com a porosidade secundária proveniente das falhas e fraturas geradas por esforços mecânicos, consegue armazenar e transmitir água.

Para o último tipo de classificação tem-se como parâmetro a pressão da água. Feitosa e Filho (1997) fizeram da seguinte forma:

- **Aquíferos Livres**: Unidades que possuem no seu limite superior uma camada permeável e no inferior uma impermeável, sofrendo portanto apenas pressão atmosférica.
- **Aquíferos Confinados**: Unidades limitadas nas regiões superior e inferior por camadas impermeáveis, e por conta disso a pressão dentro desse tipo de aquífero é maior que a atmosférica.

Uma vez que existem diferentes configurações nas quais os aquíferos podem se apresentar, existem também metodologias geofísicas para obtenção indireta de informações que tornem possível caracterizá-lo. Neste trabalho, as propriedades elétricas serão a base para o delineamento e definição do aquífero. Com foco na resistividade e no Método Eletrorresistivo, o estudo destas propriedades medidas em subsuperfície e suas implicações na análise geofísica será abordado no próximo Capítulo deste trabalho.

Capítulo 2

Metodologia

Esta seção trata do estudo do Aterro Metropolitano Centro através da resposta elétrica que a subsuperfície produz quando submetida a fonte ativa de correntes em superfície. Na aquisição de dados foi utilizado o método geofísico eletrorresistivo a partir da técnica de perfilagem elétrica conhecida como Caminhamento Elétrico. Após a aquisição, com o objetivo de gerar os perfis para interpretação da área, os dados foram processados por inversão matemática no software comercial ZondRes2D (Software, 2001). O resultado do processamento gerou perfis de eletrorresistividade que foram interpretados geofísica e geologicamente a fim de se indicar os locais de alocação dos poços de monitoramento e de produção. A seguir, importantes informações sobre o método eletrorresistivo e sua associação com a geologia, bem como particularidades do software ZondRes2D são apresentadas.

2.1 Resistividade Elétrica das Rochas

A resistividade elétrica ρ retrata a dificuldade que a corrente elétrica encontra quando flui por algum tipo de material, sendo portanto o inverso da condutividade elétrica. Os dois tipos principais de condução elétrica são nomeados como eletrônica e eletrolítica, sendo que o primeiro tipo ocorre nos materiais que possuem elétrons livres, sobretudo os metais, enquanto que o segundo tipo é decorrente dos íons livres presentes em fluidos contidos nos interstícios do material geológico. Quando se fala de rochas, o processo de condução elétrica que predomina é a eletrolítica, em decorrência dos íons dissolvidos presentes nos fluidos contidos nos poros das formações. Como resultado, a condutividade elétrica total de um meio saturado depende dos elementos texturais das formações, tais como porosidade, geometria dos poros, conteúdo de argila e morfologia do grão, assim como das propriedades elétricas dos fluidos saturantes (Batista, 2007; Lima, 2014). Tais influências podem ser relacionadas

matematicamente através da Lei de Archie (1942):

$$\rho_t = a\rho_w\phi^{-m}S_w^{-n}, \tag{2.1}$$

onde:

- ρ_t é a resistividade elétrica total da rocha;
- a é o coeficiente litológico obtido empiricamente;
- ρ_w é a resistividade elétrica da água entre os poros;
- ϕ é a porosidade da rocha e m o seu índice de cimentação obtido empiricamente;
- S_w a saturação em água da rocha e n o expoente de saturação.

A resistividade elétrica é uma das propriedades físicas de maior intervalo de variação nas rochas, no entanto, diferentes tipos de rochas podem apresentar a mesma resistividade em configurações diferentes (Tabela 2.1). Desta forma, a interpretação destes contrastes é feita em colaboração com as informações geológicas prévias do local estudado.

Rocha	**Resistividade (Ωm)**
Ígnea	$10^2 - 10^6$
Metamórfica	$50 - 10^6$
Argila	$0,8 - 10^2$
Areia mole	$0,5 - 10$
Areia dura	$9 - 10^2$
Areia	$50 - 10^3$
Arenito	$50 - 10^3$
Calcário poroso	$90 - 10^4$
Calcário denso	$10^3 - 10^6$

Tabela 2.1: Intervalos de resistividade elétrica para diferentes tipos de rochas (Extraído de Novais (2014))

2.2 Método Eletrorresistivo

O método eletrorresistivo estuda o fluxo de corrente elétrica nas formações geológicas a partir de medidas da diferença de potencial elétrico entre um par de eletrodos posicionados

na superfície do terreno e estão associadas a distribuições de correntes elétricas contínuas, tanto de origem artificial como natural (Telford et al., 1976). O caso de origem natural é conhecido como Potencial Espontâneo e não será abordado neste trabalho. Conrad Schlumberger foi pioneiro da introdução de fontes de corrente elétrica na terra a fim de estudar sua subsuperfície (Machado, 2008).

Na prática, as técnicas geofísicas de eletrorresistividade são realizadas utilizando eletrodos afixados ao solo e conectados por fios a um equipamento que além de injetar corrente no solo, também faz medidas da diferença de potencial resultante da fonte. Assim, conhecidas tais correntes e diferenças de potencial, pode-se inferir os valores de condutividade e resistividade. Após devidamente interpretadas com o auxílio de dados diretos preexistentes, as variações de condutividade e resistividade podem ser associadas com inúmeros parâmetros geológicos e hidrológicos, como: profundidade do nível freático, espessura das camadas, contatos litológicos, espessura do manto de alteração e profundidade do embasamento. A chave para entender o método eletrorresistivo está na Lei de Ohm e no princípio de conservação da carga elétrica (Gandolfo, 2007).

2.2.1 Lei de Ohm e Conservação da Carga Elétrica

A Lei de Ohm é uma importante equação da física que relaciona o campo elétrico $\mathbf{E}$, a densidade de corrente $\mathbf{J}$ e a condutividade elétrica σ. Entretanto, como o foco final deste trabalho é a interpretação de perfis de resistividade para alocação de poços, será dada preferência à escrita da lei de Ohm com o inverso da condutividade elétrica, a resistividade ρ. Portanto, coerente com Gandolfo (2007), tem-se:

$$\mathbf{E} = \rho\mathbf{J} \tag{2.2}$$

Na associação de tal equação com o princípio da conservação da carga elétrica, consegue-se obter uma importante equação para o potencial elétrico. Segue-se que em condições estacionárias, o fluxo de corrente de entrada e saída em um determinado volume é nulo, indicando que não há acúmulo de carga elétrica em seu interior, o que permite escrever as equações de Maxwell da seguinte forma (Telford et al., 1976):

$$\nabla \times \mathbf{E} = 0 \tag{2.3}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = 0 \tag{2.4}$$

Como o campo elétrico é conservativo devido a nulidade do seu rotacional, pode-se escrevê-lo como uma função potencial (Sato, 2002):

$$\mathbf{E} = \nabla V \tag{2.5}$$

Ao combinar a Eq. 2.2 (lei de Ohm) com a Eq. 2.4, tem-se:

$$\nabla \cdot \mathbf{J} = \nabla \cdot \left(\frac{1}{\rho}\mathbf{E}\right) = 0 \tag{2.6}$$

Substituindo o inverso da resistividade ρ pela condutividade elétrica σ e combinando com a Eq. 2.5, pode-se escrever:

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla V) = 0. \tag{2.7}$$

Caso a região estudada apresente condutividade constante e diferente de zero, a equação a ser satisfeita pelo potencial elétrico V será a equação de Laplace:

$$\nabla^2 V = 0. \tag{2.8}$$

2.2.2 Potencial Elétrico em Meio Homogêneo e Resistividade Aparente

No caso de um eletrodo pontual de corrente estar fixado no interior de um semi-espaço condutor homogêneo e isotrópico, o potencial elétrico V, considerando o espaço como um meio esférico de raio r, será dado por:

$$V = \frac{I\rho}{2\pi r}, \tag{2.9}$$

onde I é a intensidade de corrente do eletrodo pontual.

Esta equação fornece a relação fundamental para toda aquisição elétrica feita na terra. Porém, em casos de mais de um eletrodo de corrente, o potencial seria avaliado como a soma dos potenciais individuais de cada eletrodo pois a equação de Laplace é linear e a soma de duas ou mais soluções também é uma solução. Logo, pelo princípio da superposição, tem-se (Telford et al., 1976):

$$\Delta V = \frac{I\rho}{2\pi}\left[\left(\frac{1}{AM - BM}\right) - \left(\frac{1}{AN - BN}\right)\right], \tag{2.10}$$

onde AM, BM, AN e BN são os espaçamentos entre eletrodos.

Ao isolar o parâmetro resistividade, chama-se de fator geométrico a expressão:

$$K = 2\pi\left[\left(\frac{1}{AM - BM}\right) - \left(\frac{1}{AN - BN}\right)\right]^{-1} \tag{2.11}$$

O que resulta na equação de resistividade elétrica usada no método eletrorresistivo:

$$\rho = \frac{K\Delta V}{I} \tag{2.12}$$

Entretanto, sabe-se que a Terra não possui as condições ditas anteriormente, ou seja, não é homogênea e nem isotrópica. Isso faz a necessidade de criar o conceito conhecido

como resistividade aparente. De acordo com Sato (2002), tal conceito pode ser definido como a resistividade elétrica de um meio homogêneo que, substituindo um meio heterogêneo, provocaria as mesmas reações elétricas observadas nas mesmas condições geométricas dos eletrodos. Portanto, a expressão calculada anteriormente não se refere à resistividade de meios heterogêneos e anisotrópicos como a Terra, mas sim à resistividade aparente ρ_a. Quando se têm os quatro eletrodos posicionados em locais de resistividades ρ_1, ρ_2, ρ_3, ρ_4, a resistividade medida (aparente) possivelmente não será igual a nenhuma das quatro, mas terá influência sobre todas elas, de suas respectivas distribuições e geometria dos corpos (Gandolfo, 2007).

2.2.3 Arranjo de Eletrodos

Como já visto anteriormente, é necessário o conhecimento do valor do fator geométrico K para calcularmos a resistividade aparente. O termo K é definido a partir da disposição dos eletrodos de potencial e de corrente na aquisição em campo, sendo o nome dessa disposição arranjo. Embora não haja nenhuma restrição quanto a distribuição de eletrodos numa aquisição, os diferentes arranjos existentes possuem particularidades relacionadas principalmente a sensibilidades verticais e horizontais de resistividade elétrica (Sato, 2002).

Arranjo Dipolo-Dipolo

O arranjo de eletrodos Dipolo-Dipolo é um dos mais utilizados no estudo de águas subterrâneas. O espaçamento a entre eletrodos de corrente e entre eletrodos de potencial são fixos durante toda a aquisição, conforme podemos ver na figura abaixo:

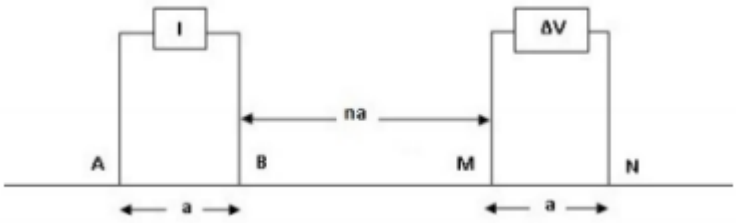


Figura 2.1: Disposição dos eletrodos de corrente (A e B) e dos eletrodos de potencial (M e N) no arranjo Dipolo-Dipolo (retirado de (Amarante, 2014)

A aquisição, portanto, decorre de uma série de medidas em que aumenta-se a distância **na**. Cada aumento da distância entre os dipolos de corrente e potencial corresponde a um nível investigativo de profundidade, sendo que quanto maior essa distância, maior a

profundidade. O limite para esse aumento é quando as leituras de potencial são superiores ao ruído do local (Gandolfo, 2007).

2.2.4 Caminhamento Elétrico

O Caminhamento Elétrico (CE) é uma técnica de método eletrorresistivo bidimensional que foca na variações laterais de resistividade que as formações geológicas trazem como resposta geofísica. Sendo amplamente utilizado no estudo de aquíferos, o CE foi também a técnica utilizada neste trabalho.

Várias estruturas ou processos geológicas como diques, fraturas e descontinuidades podem ser identificadas através desta técnica. De acordo com Gallas (2000), o arranjo mais comum a ser utilizado nesta técnica é o Dipolo-Dipolo, pois tem a vantagem da simetria e por consequência uma maior facilidade na interpretação de anomalias. A figura abaixo ilustra a técnica:

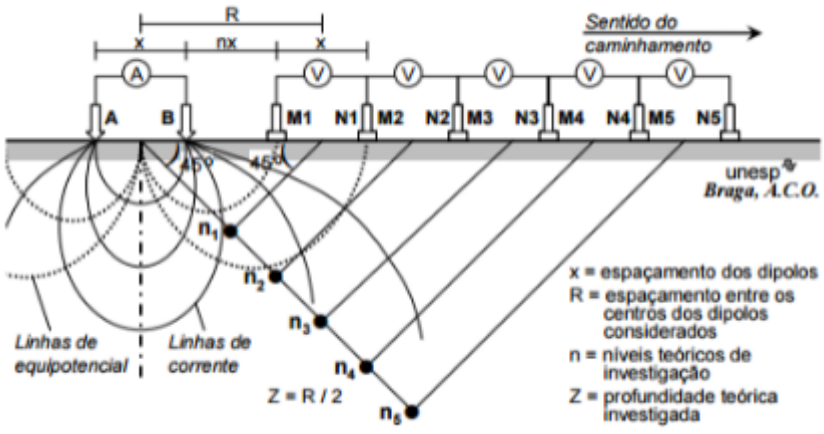


Figura 2.2: Técnica do Caminhamento Elétrico utilizando um arranjo Dipolo-Dipolo (Braga, 2016)

Ao utilizar o arranjo Dipolo-Dipolo, é estabelecido um espaçamento constante de eletrodos, o mesmo entre eletrodos de potencial e eletrodos de corrente, e perfila-se com os mesmos ao longo da superfície efetuando as medidas de resistividade aparente correspondentes a cada posição, até que no fim todo o perfil desejado é investigado. Nessa configuração, de acordo com Gallas (2000), a profundidade de investigação não depende apenas da geometria utilizada na aquisição, mas também dos contrastes de resistividade na subsuperfície. Zorzi e Rigoti (2011) explicam que, na teoria, tal profundidade varia de AN/4 em meio bastante resistivo e AN/10 em meio altamente condutor.

2.2.5 Inversão Bidimensional de Dados e ZondRes2D

Na inversão bidimensional (2D) de dados, variações tanto verticais como horizontais de resistividade ao longo da linha de levantamento são consideradas, sendo portanto estas variações contempladas na técnica de Caminhamento Elétrico, resultante numa ótima escolha para mapeamentos geológicos. Neste trabalho, a inversão foi realizada com o programa ZondRes2D, que é um software computacional para determinar de forma automática modelos 2D de resistividade elétrica em subsuperfície. O método pelo qual o ZondRes2D se baseia é a uma variação do método dos mínimos quadrados, introduzindo as informações dadas *a priori* pela seguinte equação (Software, 2001):

$$\left(\mathbf{A}^T\mathbf{A} + \mu F\right)\mathbf{d} = \mathbf{A^T g}, \tag{2.13}$$

onde $F = f_x f_x^T + f_z f_z^T$, sendo:

- f_x é o filtro de nivelamento horizontal;
- f_z é o filtro de planicidade;
- $\mathbf{A}$ é a matriz das derivadas parciais;
- μ é o fator de amortecimento;
- $\mathbf{d}$ é o vetor de perturbação do modelo;
- $\mathbf{g}$ vetor discrepância.

O ZondRes2D permite o usuário selecionar alguns parâmetros antes de realizar a inversão, como ajuste de pesos para medições, alteração de características de diferentes células de dado e corte das bordas do modelo por ângulo ou nível de sensibilidade, embora já tenha no seu sistema valores preestabelecidos. Pela equivalência de problemas geofísicos de inversão, a qualidade dos dados obtidos depende da quantidade de dados usados, bem como informações adicionais como a topografia, por exemplo. Uma vantagem do software ZondRes2D é a plotagem de seções criando uma visualização pseudo 3D com posição relativa entre as seções correspondentes às reais, pois são inseridas as coordenadas UTM de início e fim das linhas. É possível também indicar ao programa a profundidade da base dos blocos, mas como este último critério não leva em conta a resistividade do meio, isso acaba causando uma certa limitação ao programa, uma vez que em meios condutivos a penetração da corrente é menor, o que leva a uma menor profundidade de investigação (Software, 2001).

Capítulo 3

Aquisição, Tratamento e Interpretação dos Dados Geoelétricos

Esta seção descreve o processo de aquisição dos dados geoelétricos no Aterro Metropolitano Centro, como foram feitas as inversões das pseudo-seções no software ZondRes2D e por último, com os resultados gerados nas inversões, a interpretação geológica e geofísica das estruturas em subsuperfície do aterro, sempre correlacionando com observações diretas feitas nos locais das linhas, como pontos de água superficial e caixas de chorume. A Figura 3.1 mostra a disposição das linhas no aterro.

3.1 Aquisição dos dados

A aquisição de dados deste trabalho utilizou o resistivímetro *SYSCAL R2* na técnica de Caminhamento Elétrico sob o arranjo Dipolo-Dipolo. O modelo utilizado, de propriedade da Companhia de Engenharia e Recursos Hídricos da Bahia (CERB) e fabricado pela *Iris Instruments*, é composto por uma unidade transmissora/receptora e realiza leituras simultâneas da resistividade e cargabilidade aparentes através da aplicação de uma corrente elétrica com auxílio de eletrodos afixados no solo.

É bem comum nesse tipo de aquisição introduzir uma solução salina nos locais de fixação de eletrodos para se diminuir a resistência ao contato com o terreno, conduta adotada neste trabalho. Foram feitas ao todo cinco linhas de Caminhamento Elétrico, sendo 2 no mês de Outubro de 2017 e 3 no mês de Janeiro de 2018, resultando num total de 2010 metros lineares de aquisição.

As extensões das linhas e afastamento entre eletrodos são parâmetros individuais, escolhidos de acordo com o caminho livre que se tinha para abrir os arranjos em campo e com a densidade de dado que se desejava obter para uma modelagem e interpretação satisfató-

Figura 3.1: a) em linha vermelha contínua: La - Linha d Cia Aeroporto, Lb - Linha do Horto, Lc - Linha das Bacias de Chorume, Ld - Linha da Pista Interna, Le - Linha do Centro de Podas; b) em linha pontilhada branca delimitação do aterro.

ria. A escolha para apresentação dos dados foi primeiramente mostrar uma composição de pseudo-seção, dados calculados e seção invertida para apreciação global; seguido do resultado interpretado, adotando este organograma para cada linha levantada.

3.2 Tratamento dos dados

Os dados coletados foram processados no software comercial ZondRes2D. Embora o aparelho *SYSCAL R2* tenha a opção de exportar os dados de sua memória diretamente para um computador, foi preferível anotar os dados numa planilha e posteriormente digitalizá-los em formato *.txt*, de acordo com o formato de leitura do software. A planilha contém os valores de resistividade, espaçamento entre eletrodos, nível de investigação, valores do centro do arranjo e topografia.

Uma vez feita a tabela, importamos para o software ZondRes2D para que seja realizada a inversão. Importante ressaltar que é possível mudar alguns parâmetros de *default* do programa caso necessário para otimização dos resultados, conforme Figura 3.3:

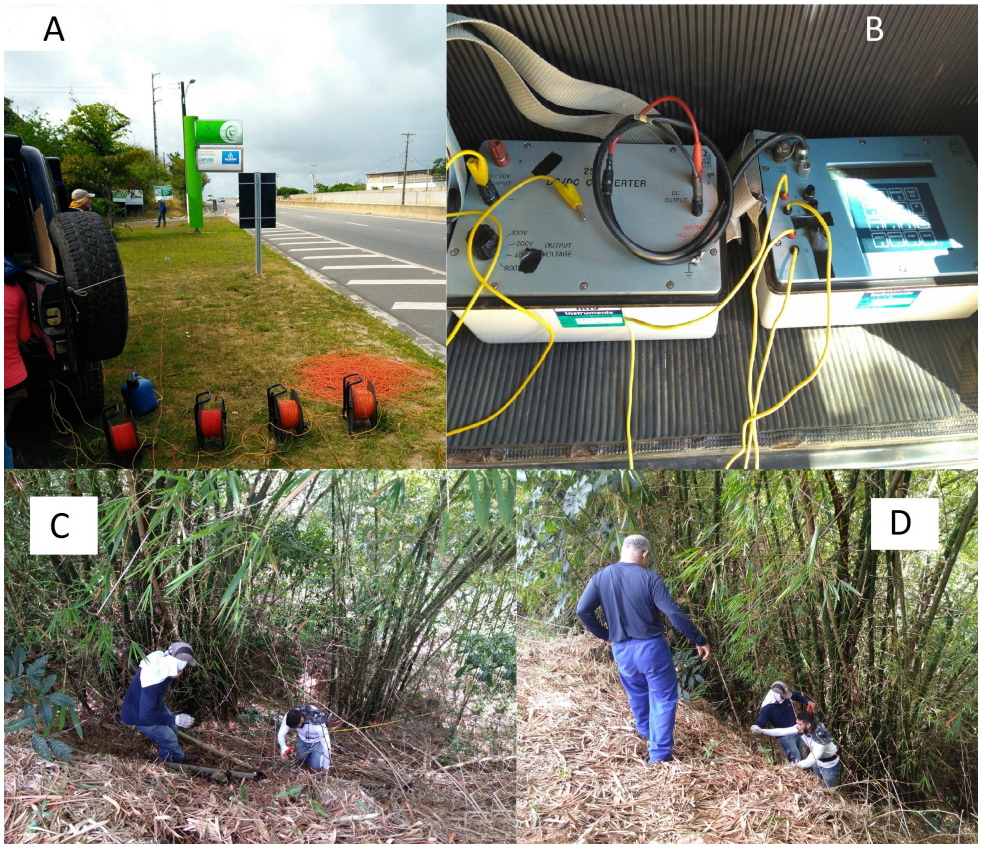


Figura 3.2: Fotos da aquisição: em sentido horário A) carretéis de fios na linha da CIA-Aeroporto, B) equipamento *SYSCAL R2* utilizado, C) instalação de eletrodo em bambuzal, D) medição de linha em bambuzal

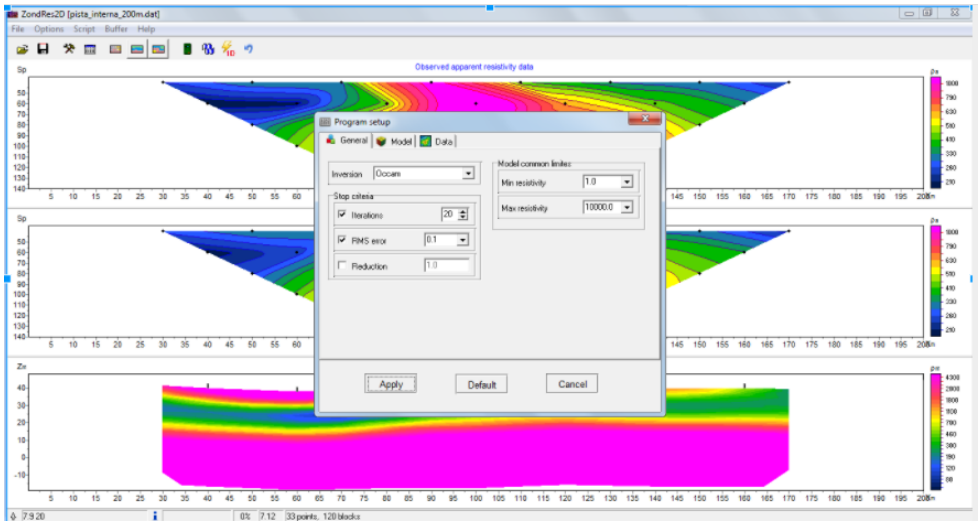


Figura 3.3: Tela do software ZondRes2D com linha invertida ao fundo e janela de edição de parâmetros sobreposta.

3.3 Interpretação dos dados

A interpretação dos dados priorizou mapear as melhores zonas para alocação de poços, abrangendo regiões onde houvesse camada de cobertura delgada e maior espessura do aquífero.

3.3.1 Linha da Cia Aeroporto

A primeira linha a ser mostrada foi realizada em paralelo com a estrada Cia Aeroporto com uma extensão de 690m entre o primeiro e último eletrodo. O espaçamento entre os dipolos é de 30m. O levantamento obteve um pacote com aproximadamente 70m de investigação, sendo plotado em cota topográfica, alcançando o máximo de 50m acima do nível do mar. Na Figura 3.4, as seções *a)* e *b)* representam, respectivamente, a pseudo-seção e a seção calculada de resistividade elétrica, sendo possível qualitativamente caracterizar uma ótima correspondência, que se confirma com o RMS de 0.009.

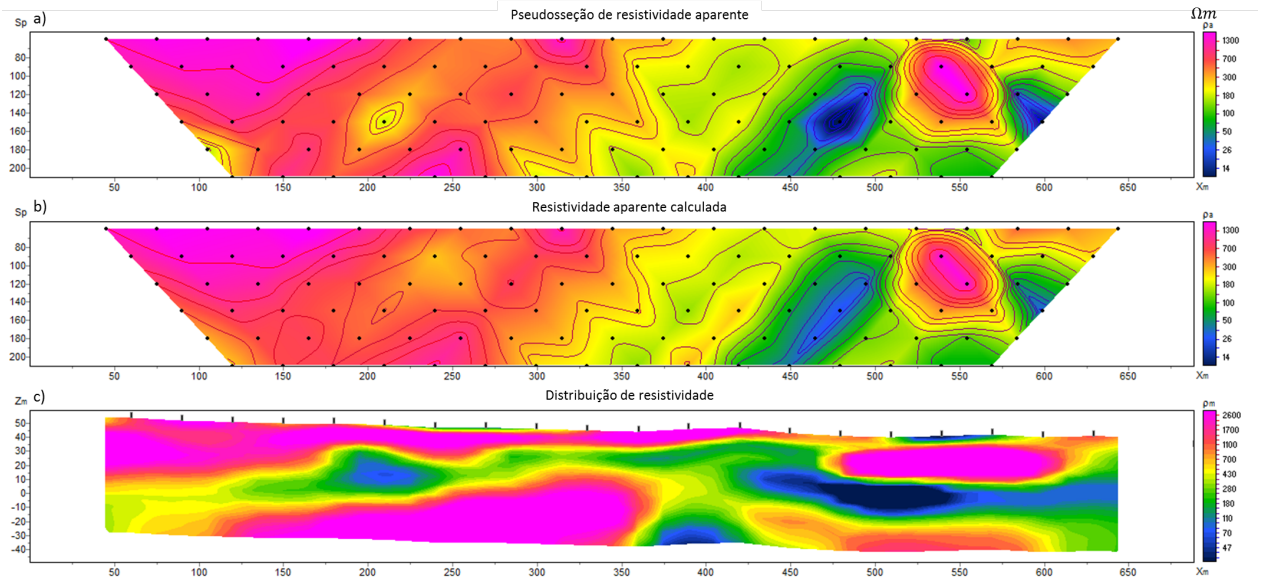


Figura 3.4: Inversão da Linha Cia Aeroporto, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno.

Linha da Cia Aeroporto - Seção Interpretada

O mapeamento da Figura 3.5 indica três porções geológicas bem distinguíveis por seus valores de resistividade elétrica. Na camada superior maiores valores de resistividade podem estar relacionados a um material pouco ou não consolidado com estrutura de solo não saturado, sendo importante ressaltar a existência de apenas uma fina cobertura mais condutiva

entre 475 e 625m que pode estar relacionada às águas pluviais, já que no momento do levantamento nesta extremidade da linha houve um período de chuva, ou até mesmo com variação na proporção de material argiloso. À porção **(3)** associamos a presença de água nos interstícios do substrato, seguida subjacentemente pelo embasamento **(2)** que apresenta-se descontinuado entre 350 e 450m.

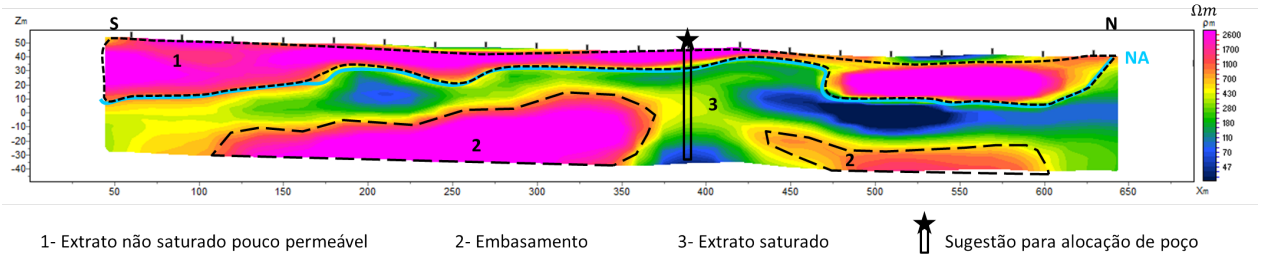


Figura 3.5: Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento.

Para a alocação de poço nesta seção, sugere-se exatamente a coordenada horizontal disposta nessa descontinuidade do embasamento, pois representar uma assinatura de possível zona contendo estruturas rúpteis (falhas e fraturas).

3.3.2 Linha do Horto

A segunda linha foi realizada numa configuração de 580m de extensão e eletrodos espaçados de 20m. A maior parte desta linha foi feita sobre pavimento, pois faz parte de uma pista posicionada em frente ao Horto do aterro (aproximadamente 360m de extensão), no entanto, cerca de 220m de aquisição foram feitos dentro de um bambuzal. O Caminhamento se estendeu, portanto, da cerca marginal do aterro de SW a NE, sendo que o primeiro eletrodo da linha situa-se dentro da mata e o primeiro eletrodo fixado no asfalto corresponde a posição de 240m no eixo horizontal dos gráficos abaixo.

Linha do Horto - Seção Interpretada

Destaca-se na Figura 3.7 uma cobertura não saturada **(1)** que apresenta-se mais espessa e com baixa condutividade no início da linha, afinando na direção NE. Isto pode ser justificado pois nesta região, que corresponde da início (SW) até a posição de 220m no eixo horizontal do gráfico abaixo, há presença de muita matéria orgânica seca e aerada cobrindo o solo e se sobrepondo às raízes da vegetação, que é composta de árvores de médio porte, bambus e densa vegetação rasteira. Ainda dentro da mata, aproximadamente entre as posições 160 e 200m, a cobertura vegetal diminui e há um curso de água superficial, o que corresponde a diminuição

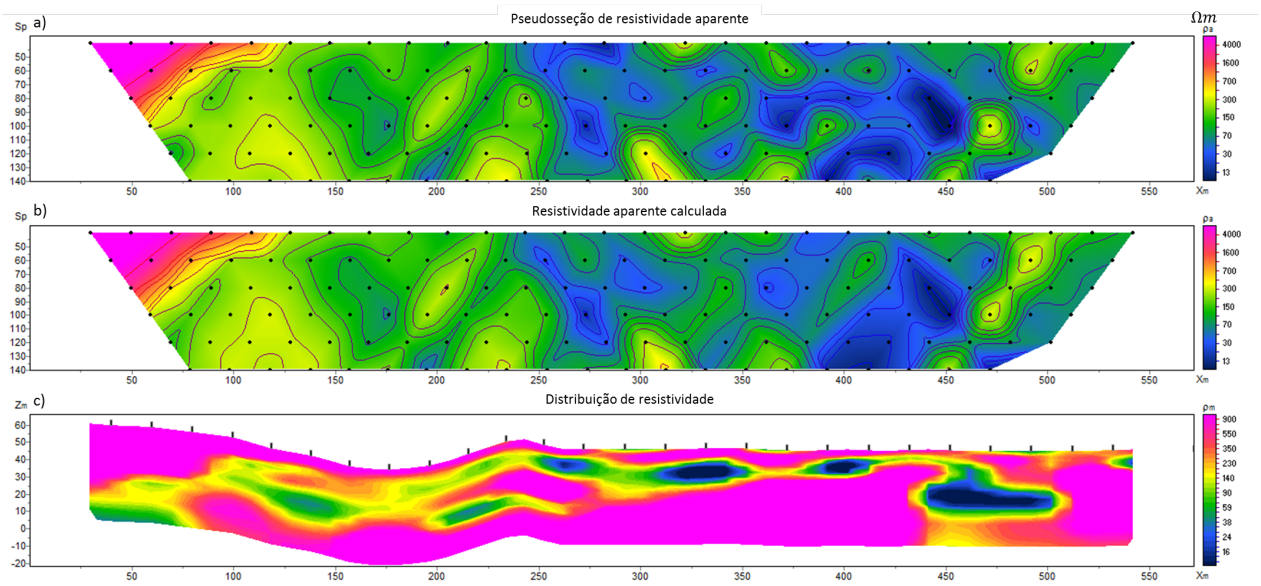


Figura 3.6: Inversão da Linha do Horto, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno.

da espessura da região **(1)** de baixa condutividade e um aumento de condutividade elétrica já correspondente à região **(3)**.

O embasamento **(2)** apresenta-se com espessura variável e identificado a partir da coordenada horizontal de 75m até o final do perfil, sendo coberto por uma camada insaturada com maiores valores de resistividade elétrica. Cabe o destaque para a porção anômala (região **(4)**) centrada na posição horizontal de 230m e cota topográfica 25m de alta resistividade inserido dentro do corpo menos resistivo, que aparenta ser um matacão. O embasamento parece alterado entre as posições 430 e 500m, o que pode ser um indicativo de contaminação devido a esta região possuir uma torre de chegada de chorume, a se confirmar com levantamentos auxiliares de detalhe e se possível análise hidroquímica da água em subsuperfície, quando disponíveis poços de monitoramento.

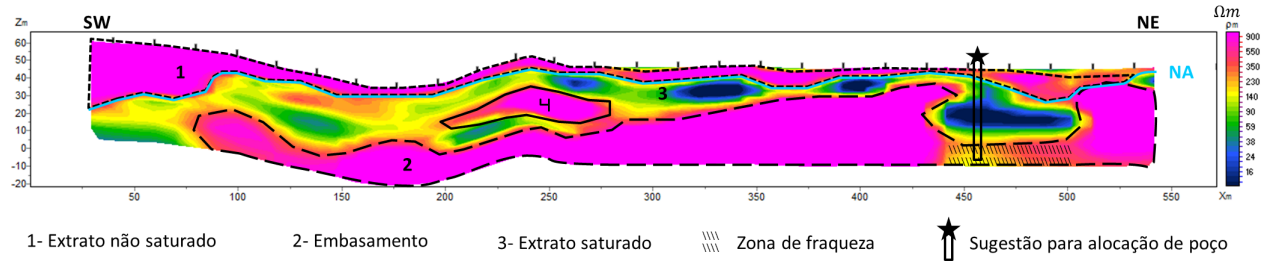


Figura 3.7: Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento.

Por fim, apontam-se como pontos para alocação de poços os intervalos de posição 60-75m e 450-500m, para que se possa esclarecer a ocorrência da anomalia condutiva presente.

3.3.3 Linha das Bacias de Chorume

A terceira linha(Figura 3.8) corresponde ao perfil realizado com 360m de extensão na lateral da pista paralela às Bacias de chorume do aterro, utilizando um espaçamento de 30m entre os eletrodos. Assim como na Linha da Cia Aeroporto, cabe destacar que a inversão dos valores para essa linha alcançou alto ajuste dos dados com um RMS de 0.011, produzindo valores de resistividade verdadeira no intervalo 16-900 $\Omega.m$, com predominância de intervalos mais resistivos em profundidade e mais condutivos nas porções mais superiores.

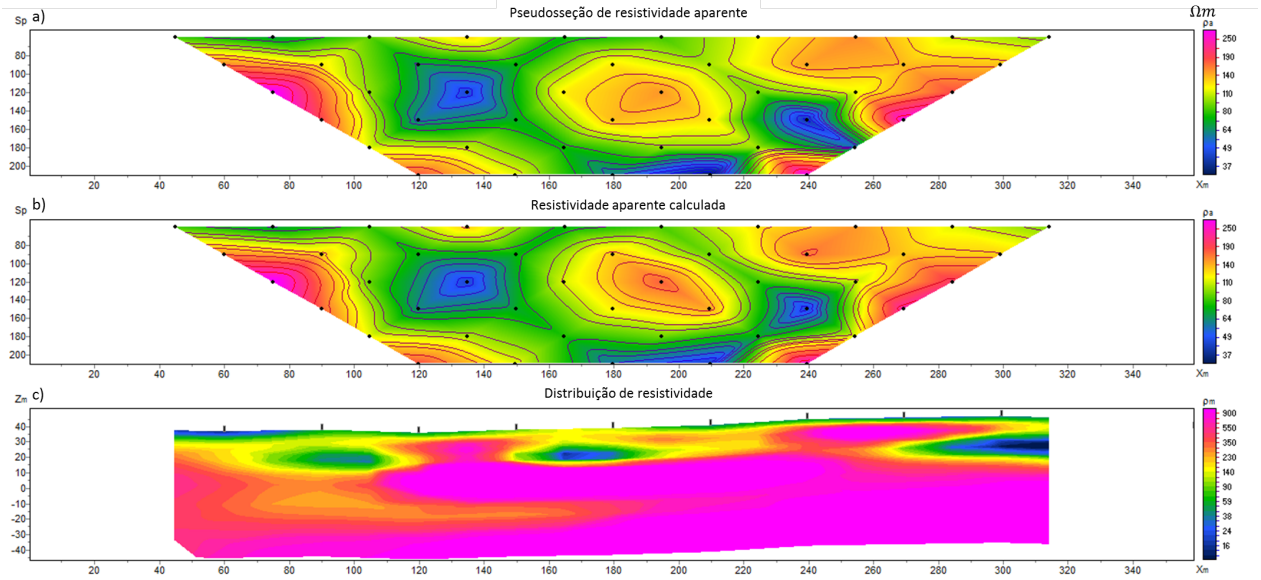


Figura 3.8: Inversão da Linha paralela às Bacias de Chorume, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno.

Linha das Bacias de Chorume - Seção Interpretada

Na seção (Figura 3.9) que reproduz o comportamento elétrico em profundidade da linha paralela à Bacia de Chorume disposta na direção NW-SE, o nível d'água ocorre nas cotas de 35m nas porções mais superficiais e 20m nas mais profundas. Ao solo saturado **(1)**, associamos os baixos valores resistivos distribuídos continuamente em toda extensão do terreno coberto por uma estreita camada condutiva de espessura quase uniforme de aproximadamente 4m, que pode estar relacionada à pluviosidade do período do levantamento, associada à menor compactação da porção, bem como à presença de inúmeros poços de monitoramento.

Cabe também ser destacado que dentro do horizonte saturado há mudanças laterais de litofácies (pontilhado preto) e que abaixo, a porção **(2)** indica o embasamento no qual é dominante a baixa permeabilidade. Como exceção a esta característica do embasamento temos a porção que se estende alongada de 60 a 80m na direção NW-SE e intervalo de cota de -25 a 0m, na qual acredita-se, tal qual na Linha do Horto, ser uma zona de fraqueza do embasamento, com possível infiltração de compostos contaminantes provenientes dos depósitos de resíduos. Desta forma, sugere-se que o poço para estudo da qualidade das águas seja posicionado de forma a alcançar este volume (aproximadamente na posição horizontal de 100m).

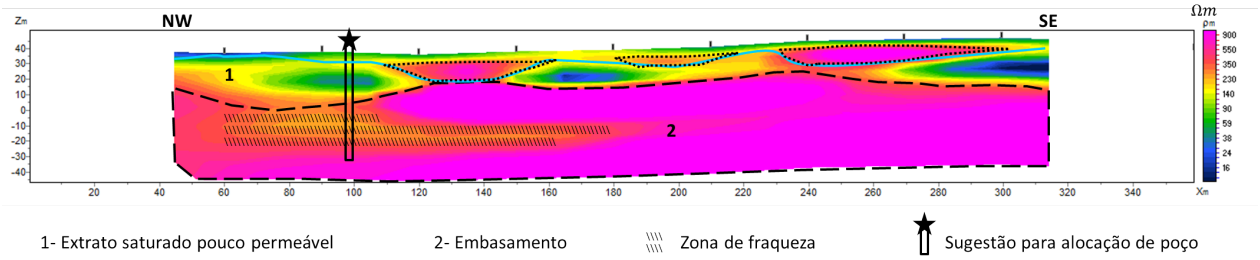


Figura 3.9: Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento.

3.3.4 Linha da Pista Interna

A quarta linha a ser apresentada foi uma das realizadas em Outubro de 2017. Perpendicular à Linha do Horto existe uma via pavimentada nomeada de Pista Interna, que por sua vez faz parte do acesso trafegável da entrada do aterro até o local onde os caminhões depositam diariamente os resíduos. Nesta linha, foi feito a perfilagem elétrica de 220m com espaçamento entre eletrodos de 20m, o que resultou na pseudo-seção apresentada abaixo da Figura 3.10 a).

Vale novamente a ressalva da qualidade do ajuste para esta linha, cujo RMS de 0.0093 resultou em dados calculados da Figura 3.10 b) que conservam quase fielmente todas as feições medidas, produzindo um mapa de resistividade que indica um susbtrato de característica acamadada da Figura 3.10 c). Os valores de resistividade verdadeira variam de 80 a 4300 $\Omega.m$ e apresentam coerência com as outras seções sem dados topográficos previamente obtidas.

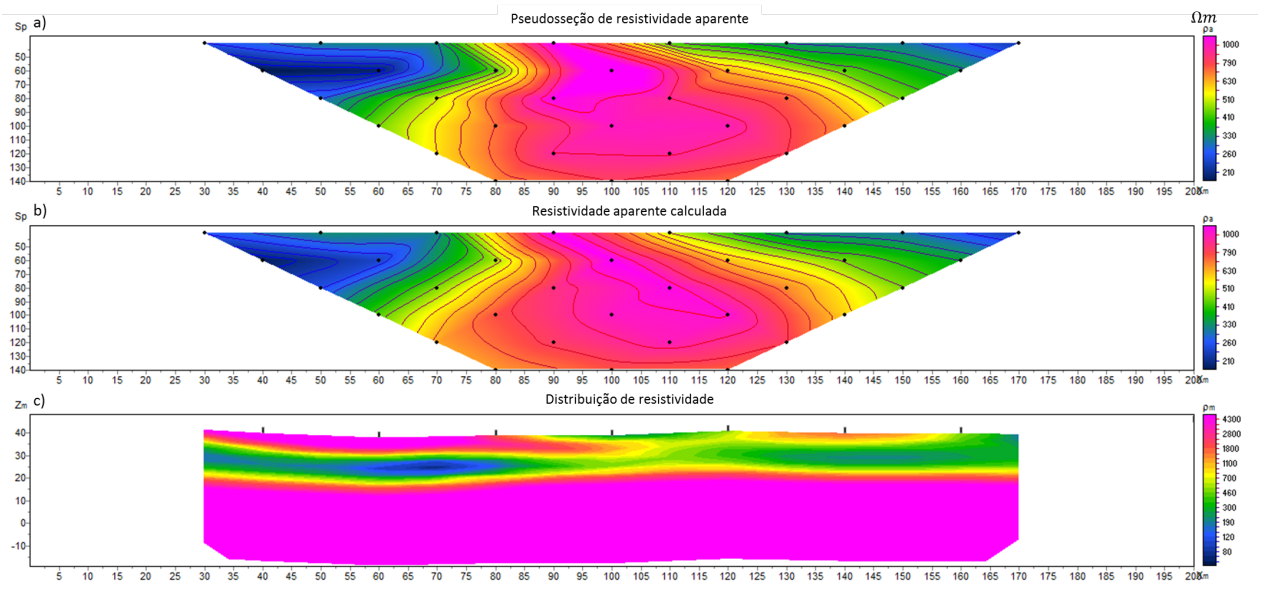


Figura 3.10: Inversão da Linha da Pista Interna, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno.

Linha da Pista Interna - Seção Interpretada

Identifica-se, na Figura 3.11 c), três porções de comportamento horizontal bem distintas por valores de resistividade contrastantes. A primeira, com espessura de aproximadamente 7 metros, estende-se até a metade do perfil e indica uma variação lateral de resistividade provavelmente relacionada a aumento da argilosidade e consequentemente maior porosidade em superfície, acarretando maior ocupação dos interstícios da cobertura pela água da chuva e também por cursos de águas superficiais presentes (aproximadamente entre 80 e 170m do eixo horizontal).

A camada **(2)** (Figura 3.11) seria o embasamento composto de rocha cristalina de baixíssima permeabilidade, consequentemente 'delimitando' inferiormente o aquífero que se apresenta pela porção de rocha saturada **(3)** (Figura 3.11). Notamos também que a região desta linha de maior condutividade vai do início da mesma até aproximadamente a posição horizontal de 80m. É importante esse destaque pois esta estrutura mais condutiva é justamente a parte mais próxima e de quase intersecção com a Linha do Horto (na posição de aproximadamente 480m), o que pode ser conferido na Figura 3.7 como sendo também a região em que há maior condutividade desta respectiva linha.

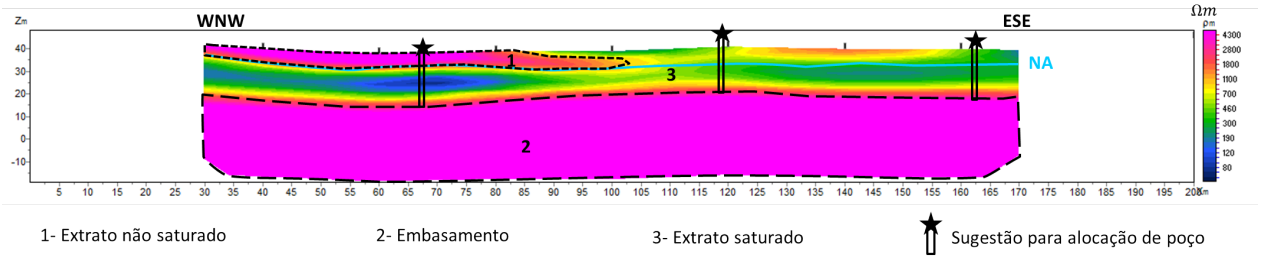


Figura 3.11: Seção de resistividade verdadeira interpretada. Em azul o nível do aquífero e destacado com estrela a sugestão para locação do poço de monitoramento.

3.3.5 Linha do Centro de Podas

Como última linha a ser apresentada tem-se uma de curto Caminhamento Elétrico, possuindo 160m de extensão e espaçada de 20m. Inicialmente, a intenção era que se estendesse até próximo ou até mesmo cruzasse a Linha da Pista Interna, porém devido a presença de mata de difícil acesso isto não foi possível. Consequentemente, foi realizada sobre um pequeno morro artificial, resultante da deposição acumulada de volumes de solo deslocados de diferentes partes do aterro.

A pseudo-seção e seção calculada (RMS de 0,00047) estão apresentadas respectivamente nas Figuras 3.12 a) e b) seguidas pelo mapeamento das resistividades na Figura 3.12 c) que apresentou valores variando de 56 a 600 $\Omega.m$. Destaca-se também a variação topográfica do morro artificial.

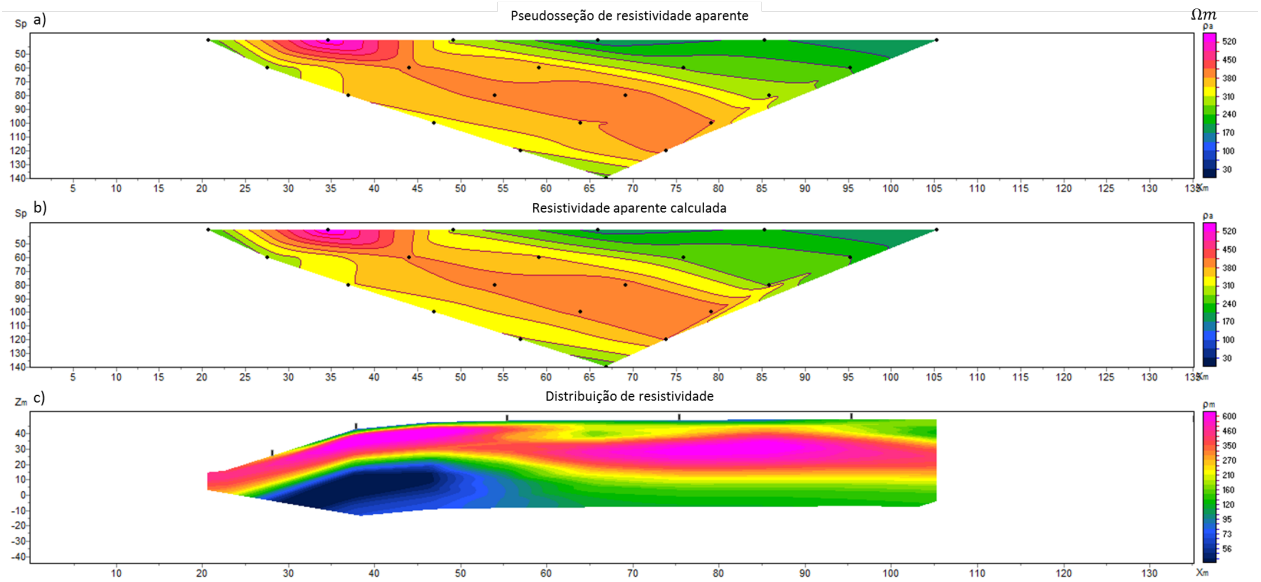


Figura 3.12: Inversão da Linha do Centro de Podas, sendo a) dados medidos, b) dados calculados e c) distribuição de resistividades do terreno.

Linha do Centro de Podas - Seção Interpretada

Embora produzido artificialmente, 3 camadas horizontais caracterizadas pelos contrastes de resistividade podem ser determinados: **(a)** cobertura condutiva permeável com acúmulo de umidade devido a pluviosidade, **(b)** uma porção mais argilosa e menos permeável e **(c)** um corpo condutivo que acredita-se ser continuidade do corpo que corta o final da Linha do Horto, o início da Pista Interna e alcança o morro artificial, indicando que a porção mais profunda condutiva do mesmo possa ser natural.

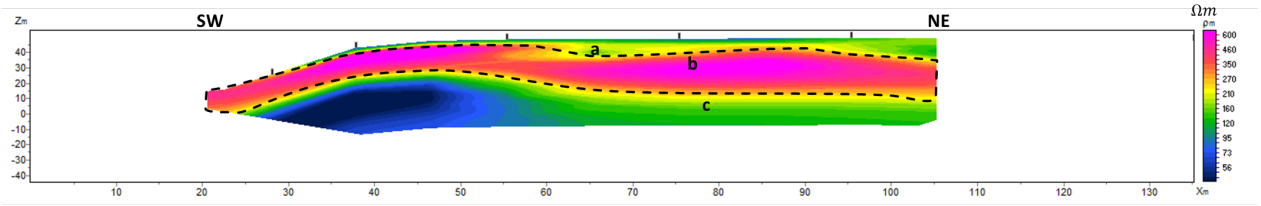


Figura 3.13: Seção de resistividade verdadeira interpretada.

Capítulo 4

Conclusões

O uso da técnica geofísica de Caminhamento Elétrico se mostrou eficiente para o objetivo deste trabalho, uma vez que foi possível mapear bem as estruturas geológicas em supsuperfície do aterro. A análise das imagens obtidas permitiu sugerir pelo menos seis locais para alocação dos poços de monitoramento.

Um levantamento paralelo da topografia relacionada a cada linha de caminhamento tornou possível introduzir esta informação na modelagem. As inversões realizadas tiveram um alto ajuste de dados, o que possibilitou gerar modelos geológicos bastante coerentes as informações prévias provenientes do modelo geológico local descrito por Trabalho de Graduação em Geologia - UFBA; uma Tese de Doutorado de Geofísica - UFBA; um relatório técnico descritivo produzido pela empresa de consultoria ambiental Umwelt, que serviram de apoio teórico à interpretação geofísica.

A situação do levantamento considerou fatores geográficos e também a metereologia do período. Vários foram os percalços para que as linhas fossem posicionadas, como cursos de águas superficiais, mata extensa e densa, além do fato de ter chovido em alguns dias previstos para aquisição. A principal vantagem da utilização do método de Caminhamento Elétrico foi a possibilidade de detectar as variações bidimensionais de resistividade elétrica em subsuperfície, caracterizando geologicamente o aquífero e tornando possível fornecer um mapeamento que pode direcionar o planejamento dos poços de monitoramento.

Por fim, sugere-se que os trabalhos futuros tentem avaliar outras regiões do aterro, planejando, por exemplo, a abertura de locais de mata fechada, o que pode ser um bom adendo às informações já obtidas. Além disso, uma vez alocados os poços, é de suma importância que haja análise hidroquímica do conteúdo presente nos mesmos, para que se meça a qualidade da água subterrânea e se confirme algumas interpretações realizadas.

Agradecimentos

Certamente, esta parte do trabalho foi a que mais gostei de escrever. No fundo dos meus pensamentos, eu já previa isso, já que muitas foram as vezes que pensei em desistir do curso. Resolvi, então, agradecer de forma diferente do que costumam fazer. Inicialmente, não farei distinção entre amigos, família e professores, uma vez que em muitos casos essas "classificações"naturalmente se misturam.

Dito isso, agradeço à todas as pessoas que fizeram parte positivamente de minha vida durante todo esse processo. Se você que está lendo agora lembra de alguma história engraçada comigo, algum conselho que você me deu ou até mesmo a escuta de um desabafo, fica o meu eterno agradecimento. Você, que também permitiu que isso fosse recíproco e como uma boa amizade me deixou ser uma pessoa melhor ao tentar te ajudar, também o meu eterno agradecimento. Uma menção especial ao Sindicato e melhor In Box do Facebook (essa vitória é nossa!), Geofamily, Los Hombres, Peripécias, Cabras, ***** e Ladrões, Quatro Cantos e tantos outros da Geofísica e da vida que simplesmente sei que não terão dúvidas em lembrar das tais boas histórias que mencionei anteriormente. Se você fez parte disso, você sabe.

Agradeço a um dos maiores professores que podemos ter nessa vida: o fracasso. Algo de muito curioso está presente nele. Deixamos de fazer algo por medo de fracassar sem perceber que isso por si só já é um fracasso. O evitamos à todo custo, mas quando ele naturalmente acontece, não sabemos tirar proveito disso. Longe de mim vestir a hipocrisia e dizer que gosto de fracassar: o que eu aponto aqui é para melhorarmos nossa relação com ele. Com a permissão do clichê, se estou onde estou é porque fracassei muitas vezes até chegar aqui e continuarei fracassando, já que isso faz parte da vida.

Embora não tenha feito distinção inicial, é hora de agradecer especificamente aos que tornaram este trabalho possível e muito mais fácil do que seria normalmente.

À toda minha família, em especial meus pais e irmãos, por me acolherem e me ajudarem durante esses anos, o meu muito obrigado.

Agradeço à minha orientadora e professora Suzan, que sem dúvidas se doou bastante neste trabalho. Sem a sua ajuda, eu ainda estaria escrevendo o Capítulo 1.

Agradeço aos professores Luiz Rogério e Rogério Porciúncula pelo acolhimento no pro-

jeto, ajuda em campo, nas interpretações e por fazerem parte da banca.

Obrigado ao meu amigo e professor Alexsandro Cerqueira pelo companheirismo e pela ajuda na modelagem dos dados.

Pato, meu amigo, você também é parte disso. Sem a sua ajuda eu não teria entregue nem o relatório deste trabalho.

Agradeço à BATTRE, empresa responsável pelo Aterro Metropolitano Centro, por permitir o estudo dentro do aterro e à CERB pela disponibilização do aparelho e dos técnicos para realização das aquisições. Muito obrigado ao técnico Bahia, o *Capitão do Mato*, que foi de indispensável ajuda neste trabalho. Obrigado a Mota, o motorista do IGEO, pela ajuda na aquisição e no transporte. Aos outros que também ajudaram no levantamento: Lucas, Yuri, Airton, Jorge e Lenon, muito obrigado.

Por fim, agradeço à vida.

Referências

Amarante, E. M. d. S. (2014) Interpretação de Seções de Resistividade e Cargabilidade Aparente, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

BAHIA (1992) Plano Diretor de Mineração para a Região Metropolitana de Salvador, Secretaria da Indústria, Comércio e Turismo, Superintendência de Geologia e Recursos Minerais, Salvador.

Barbosa, J. S. F.; Correa-Gomes, L. C.; Dominguez, J. M. L.; Cruz, S. A. S. e Souza, J. S. D. (2005) Petrografia e litogeoquímica das rochas da parte oeste do alto de Salvador, Bahia.

Batista, J. d. C. (2007) Comportamento elétrico de arenitos da Formação Maracangalha observado em testemunhos e afloramentos da Ilha dos Frades, Bahia, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Braga, A. C. O. (2016) Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia, Oficina de Textos.

Cavalcanti, S. S. (1999) Hidrologia subterrânea na área do aterro sanitário de Salvador usando métodos geofísicos elétricos, Dissertação de mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil.

Duarte, N. T. (2016) Caracterização Hidrogeológica e Hidroquímica do Aterro Metropolitano Cento, Salvador - BA, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Feitosa, F. A. C. e Filho, J. M. (1997) Hidrogeologia: Conceitos e aplicações, Fortaleza: CPRM, LABHID-UFPE.

Gallas, J. D. F. (2000) Principais métodos geoelétricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental, Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista.

Gandolfo, O. C. B. (2007) Um estudo do imageamento geoelétrico na investigação rasa. 2007. 215 f, Tese de Doutorado.

Lima, O. A. L. d. (2014) Propriedades Físicas das Rochas: Bases da Geofísica Aplicada, SBGF, Rio de Janeiro.

Machado, R. (2008) Aplicação do método eletrorresistivo em ambiente aquático para o mapeamento do subfundo do rio São Francisco, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

Marchi, C. M. D. F. (2011) Ecogerenciamento: aspectos das características geológicas e de gestão na construção de um modelo para instalação de aterros sanitários no estado da Bahia, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Novais, D. M. (2014) Vulnerabilidade aquífera com parâmetros geoelétricos na região do pólo industrial de Camaçari, Bahia, Trabalho de Graduação, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Porciúncula, R. D. J. e Lima, O. A. L. (2009) Aplicação do método eletrorresistivo na avaliação geoambiental da região de Alagoinhas, Bahia.

Santos, C. B. d. (2010) Avaliação hidrogeológica do Alto da Bacia do Rio Jiquiriçá-BA, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Sato, H. K. (2002) Métodos elétricos: Notas de aula, Depart. Geofísica, Inst. Geociências, Universidade Federal da Bahia.

Software, Z. (2001) Manual do Software Zondres2D.

Souza, J. S. (1987) Caracterização da resposta sísmica da Formação Barreiras quando sobreposta a superfícies cársticas, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Bahia, Brasil.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. e Keys, D. A. (1976) Applied Geophysics, Cambridge Un. Press, Cambridge.

Zorzi, R. R. e Rigoti, A. (2011) Aplicação de métodos geoelétricos para monitoramento da barragem de concreto da UHE Gov. José Richa, Boletim Paranaense de Geociências, **65**.