

Trabalho de Conclusão de Curso

Curso de Graduação em Geologia

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação de Plumas de Contaminação em
Aterros Sanitários

Larissa Ruas Galdeano

Prof. Dr. Antonio Celso de Oliveira Braga

Rio Claro (SP)

2016



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

Larissa Ruas Galdeano

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação de Plumas de Contaminação em Aterros Sanitários

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geólogo.

Rio Claro - SP
2016

551 Galdeano, Larissa Ruas
G149a Aplicação do método da eletrorresistividade na
investigação de plumas de contaminação em aterros sanitários
/ Larissa Ruas Galdeano. - Rio Claro, 2016
62 f. : il., figs., gráfs., tabs., fots., mapas

Trabalho de conclusão de curso (Geologia) - Universidade
Estadual Paulista, Instituto de Biociências de Rio Claro
Orientador: Antonio Celso de Oliveira Braga

1. Geofísica. 2. Águas subterrâneas. 3. Contaminação. 4.
Caminhamento elétrico. 5. Resíduos sólidos. 6. São Carlos. I.
Título.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JULIO DE MESQUITA FILHO”
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS E CIÊNCIAS EXATAS



Larissa Ruas Galdeano

Aplicação do Método da Eletrorresistividade na Investigação de Plumas de Contaminação em Aterros Sanitários

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao
Instituto de Geociências e Ciências Exatas - Câmpus
de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista Júlio
de Mesquita Filho, para obtenção do grau de Geólogo.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Antônio Celso de Oliveira Braga (orientador)

Prof.Dr. João Carlos Dourado

Richard Fonseca Francisco (Doutorando do curso de Pós-Graduação
de Geociências e Meio Ambiente/IGCE)

Rio Claro, 29 de Novembro de 2016.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiramente ao meu orientador, o Prof. Dr. Antônio Celso Oliveira Braga, que me auxiliou e apoiou imensamente ao longo desta pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Eduardo Zaine, agradeço o esclarecimento de dúvidas sobre o Trabalho de Conclusão de Curso e o incansável apoio ao longo de toda a Graduação.

Prof. Dr. Washington Barbosa Leite Júnior, suas valiosas lições e condução assertiva, não contribuíram só para minha formação acadêmica durante a participação no programa PET, mas também na graduação: levarei seus ensinamentos e experiências vivenciadas ao longo de minha trajetória profissional.

Não posso esquecer dos Professores Leandro Eugênio Silva Cerri e a Rosemarie Rohn Davies, que também tiveram um papel muito importantes durante o meu período no curso de Geologia. Foram muitos os excelentes professores que tive, mesmo não os citando, meu muito obrigada a todos.

Agradeço a meu chefe do estágio no Departamento Técnico na TDM Brasil, Carlos Antonio Centurión, pela compreensão nos momentos em que precisei me ausentar do estágio para resolver assuntos relacionados ao desenvolvimento deste Trabalho e em especial, pelo incentivo ao meu aprimoramento ao longo do estágio.

Gostaria de agradecer minhas duas grandes e queridas amigas da Pós-Graduação Cibele Montibeller e Carina Ribeira, que me deram muito apoio e me ajudaram ao longo da graduação. Levarei para sempre o carinho que tenho por vocês.

Acima de tudo, gostaria de agradecer à minha mãe, Luzia Alegre Ruas Galdeano, que me sugeriu o tema deste Trabalho de Conclusão de Curso e me apoiou em tudo o que eu fiz, em conjunto com o meu pai Marcos Manzano Galdeano e minha irmã Priscila Ruas Galdeano, que são as pessoas que eu mais amo na vida e que sempre me motivaram a fazer o melhor.

À todos, deixo os meus sinceros agradecimentos.

Resumo

A área de estudo do Trabalho de Conclusão de Curso situa-se no Antigo Aterro Sanitário de São Carlos, localizado na Fazenda Guaporé. Apesar de suas atividades já terem sido finalizadas, existe a possibilidade de ainda ocorrer a percolação de contaminantes e de chorume produzidos pela degradação dos resíduos sólidos por meio de uma pluma de contaminação. O objetivo da pesquisa deste trabalho consistiu na avaliação da migração lateral de uma possível pluma de contaminação no meio físico por meio de métodos geofísicos. O método utilizado por este trabalho foi o Método Geoelétrico da Eletrorresistividade, com aplicação da Técnica do Caminhamento Elétrico (CE) com arranjo dipolo-dipolo. Esta metodologia permite avaliar os valores de resistividade dos materiais em subsuperfície através de seções e mapas e indicam possíveis percolações de plumas de contaminação pela variação das resistividades medidas. Neste estudo foram feitas cinco linhas de investigação pela técnica do Caminhamento Elétrico ao longo do Aterro Sanitário, na qual resultaram em cinco pseudo-seções com medidas obtidas em campo de resistividades e profundidades aparentes que foram posteriormente processadas pelo *software* Res2dinv V. 3.5 a fim de obter modelos geoelétricos com medidas reais de resistividade. A análise integrada das pseudo-seções e modelos geoelétricos das cinco linhas de investigação em conjunto com os Mapas da cota de topo da rocha sã indicou que as anomalias de resistividade estão provavelmente relacionadas a percolação da pluma de chorume por meio dos fraturamentos da rocha sã e dos horizontes de solo alterado da rocha sã e sedimentos superficiais coluvionares, sendo recomendável uma análise físico-química por meio de perfuração de sondagem e amostragem nestes locais.

PALAVRAS-CHAVE: Águas Subterrâneas, Contaminação, Caminhamento Elétrico, Resíduos Sólidos, São Carlos.

Abstract

The researching area of the Completion of Course Work is situated on the Old Sanitary Landfill of São Carlos city, which is located in "Fazenda Guaporé". Besides its activities were already finished, there is a possibility of occurrence of a contaminants and slurry percolation produced by degradation of solid waste through a contamination plume. The objective of this research is consisted of an evaluation of lateral migration of a possible contamination plume at the environment by using geophysics methods. The method used on this research was the Geoelectric Method of Electrical Resistivity with the application of the Constant Separation Traversing (CST) technique with dipole-dipole array. This methodology allows the evaluation of materials resistivity values in subsurface by creating maps and sections and indicates possible contamination plumes percolations by the variability of the measured resistivities. There were made five investigation lines by using the Constant Separation Traversing Technique along the Sanitary Landfill, which were resulted on five pseudosections with measures of apparent resistivities and depths on the field that were posteriorly processed by the Res2dinv V. 3.5 software in order to create geoelectrical models with real values of resistivity. The integrated analysis of pseudosections and geoelectrical models of the five investigation lines in addition to the two Maps of Top Quota of Bedrock indicated that there are resistivity anomalies probably related to the percolation of a slurry contamination plume through fractures and faults of the bedrock and to the alteration soil and superficial sediment layers, which is recommended an physical and chemical investigation of those sites by accomplishing a probing drill or sampling.

KEYWORDS: Groundwater, Contamination, Constant Separation Traversing, Solid Waste, São Carlos city.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. OBJETIVOS	5
3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO	5
3.1 Localização e Características Gerais da Área.....	5
3.2 Aterros Sanitários de São Carlos	6
3.3 Geologia Regional.....	8
3.4 Geologia Local	12
3.5 Recursos Hídricos.....	16
3.5.1 Águas Superficiais	16
3.5.2. Águas Subterrâneas.....	16
4. CONCEITOS TEÓRICOS	17
4.1 Aterro Sanitário.....	17
5. MATERIAIS E MÉTODOS	19
5.1 Metodologia dos Ensaios Geofísicos.....	19
5.2 Método Geolétrico da Eletroresistividade.....	22
5.3 Técnica do Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo	26
5.4 Resistividades das Rochas	33
5.5 Resistividades das Unidades Litológicas do Aterro Sanitário de São Carlos.....	35
6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	37
6.1 Mapa de contorno da cota do topo da rocha sã, Mapa de Profundidade do Topo da Rocha Sã e Furos de Sondagem à Trado.....	37
6.2 Pseudo-Seções e Modelos Geolétricos das Linhas de investigação.	43
6.1.1. Linhas Geofísicas	44
6.3 Integração dos Resultados Obtidos.	54
7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	56
8. BIBLIOGRAFIA	57

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento crescente da população nas cidades, surgiram questões quanto à problemática da produção de resíduos sólidos e os impactos ambientais e sociais que este gera. De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), o termo “resíduo sólido” (conhecido popularmente como “lixo”) é designado para materiais, substâncias, objetos ou bem descartáveis gerados por atividades humanas em sociedade. Neste contexto, os resíduos sólidos podem ter origem de atividades diversas, dentre as quais estão as que se caracterizam no âmbito industrial, doméstico, hospitalar, comercial, agrícola, no setor de serviços e por meio de varrição (FARIA, 2016).

Segundo Moreira et.al. (2011), os resíduos sólidos são danosos à saúde pública e ao meio ambiente, uma vez que este contém diversas fontes de toxidade como tintas, solventes, pigmentos, vernizes, pesticidas, dentre outros. Dentre os subprodutos da degradação dos resíduos sólidos, um dos mais impactantes é a produção chorume, que se caracteriza como um líquido gerado pela putrefação da matéria orgânica presente nesses resíduos e que, se não tratado, pode contaminar os níveis do lençol freático e no solo e consequentemente causar graves danos ambientais e na saúde humana.

Em vista desses impactos ambientais e sociais, órgãos governamentais e entidades institucionais propuseram novas medidas de remediação e minimização dos danos causados pelo manejo inadequado dos resíduos sólidos, dentre eles a Política Nacional de Resíduos Sólidos prevista na Lei nº 12.305/10 (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, s.d.). A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) é descrita por Candiani e Moreira (2015, p.31) como o conjunto de normas para a “gestão integrada e sustentável dos resíduos sólidos urbanos, propondo medidas de incentivo à formação de consórcios públicos para a gestão de sistemas de coleta, tratamento e destinação dos resíduos sólidos urbanos”. Desta maneira, a PNRS define o conjunto de operações que objetivam o tratamento correto dos resíduos sólidos, além de também definir medidas de retorno de certos produtos por meio da reciclagem, reutilização, redução, precaução e prevenção e também estabelece metas para minimizar a disposição final

desses resíduos sólidos em seus destinos finais. Entre algumas formas de disposição final dos resíduos sólidos, destacam-se os aterros do tipo sanitário e controlado, a incineração e a compostagem, além de técnicas de coleta seletiva (MOREIRA, BRAGA, HANSEN, 2011).

Todavia, essas formas de manejo podem resultar em riscos de contaminação ao meio físico no qual foram instaladas se não houver o devido monitoramento dos possíveis agentes contaminantes. Por essa razão, diversos pesquisadores e unidades institucionais se utilizaram de métodos de investigação por meio de amostragem de solo e água subterrânea e por meio de métodos geofísicos. Sob esse contexto, o método geofísico da eletrorresistividade ganhou destaque na investigação desses contaminantes, uma vez que esse método permite a avaliação das plumas de contaminação como resultado das alterações de parâmetros de resistividade elétrica pela presença de contaminantes no meio físico (MOREIRA, BRAGA, 2009). Outra vantagem do método da eletrorresistividade se aplica em seu caráter não invasivo ao meio físico por ser uma forma indireta de investigação, ao passo que em meios de investigação diretos (como sondagem e amostragem de solos e líquidos) podem ocorrer alterações significativas ao ambiente ao gerar aberturas de caminhos preferenciais para a percolação do chorume (MOREIRA, BRAGA, HANSEN, 2011).

Das técnicas do método da eletrorresistividade, as mais utilizadas no estudo de impactos ambientais em aterros sanitários são a técnica da Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e a do Caminhamento Elétrico (CE). Segundo Xavier e Berkenbrock (2005), a técnica da Sondagem Elétrica Vertical pode ser aplicada para definir a espessura do depósito dos resíduos sólidos dispostos no aterro sanitário, o nível do lençol freático e a posição do maciço rochoso. A técnica consiste em plotar as resistividades dos materiais dispostos em subsuperfície em uma "Curva de Resistividade" a uma determinada profundidade, o que permite a determinação das espessuras dos substratos e a profundidade do lençol freático.

Os autores citados também usaram a técnica do Caminhamento Elétrico para determinar as dimensões dos limites laterais da cava e da direção preferencial do fluxo subterrâneo através do imageamento elétrico 2D e 3D. Essa técnica permite analisar os valores de resistividade dos materiais em subsuperfície por meio de perfis (imageamento 2D), mapas e blocos diagrama

(imageamento 3D), com o intuito de determinar o comportamento e a direção do fluxo do lençol freático e desta forma determinar a propagação dos possíveis poluentes. Desta maneira, o uso das técnicas de Sondagem Vertical Elétrica e do Caminhamento Elétrico podem ser usadas de forma conjunta para definir os materiais de cobertura, a espessura dos resíduos sólidos, o nível do lençol freático, a direção do fluxo subterrâneo, a profundidade dos substratos rochosos e da propagação das plumas de contaminação.

Nos estudos que envolvem a determinação da percolação do chorume produzido pela degradação dos resíduos sólidos em subsuperfície, a técnica mais utilizada para a definição do deslocamento do chorume no ambiente é a técnica do Caminhamento Elétrico. Bortolin (2009) explica que o chorume possui grande quantidade de íons oriundos da degradação dos compostos orgânicos e do ataque dos metais dos resíduos sólido, além de possuir altos teores de água das chuvas. A elevada quantidade íons e de água presente no chorume favorece a condução da corrente elétrica na forma iônica e consequentemente minimiza em demasia os valores de resistividade do meio, os quais podem ser detectados pela técnica do Caminhamento Elétrico. Segundo Elis e Zuquete (2002), essa técnica permite determinar o deslocamento lateral do chorume por meio das seções e mapas produzidos, uma vez que o chorume é indicado nessas seções por possuir valores demasiadamente inferiores (por volta de 80 Ohm.m). No entanto, os autores indicam que os valores de resistividade desses contaminantes podem variar, a exemplo do aumento da pluviosidade em estações chuvosas que podem expandir o volume de líquidos contaminantes que infiltram em maiores profundidades atingindo o nível do lençol freático e causam uma diminuição acentuada da resistividade aparente.

Além da pluviosidade, outros fatores determinam a direção preferencial do chorume no meio físico. Laureano (2007) afirma que o chorume é regido pelos mesmos mecanismos de transporte de solutos em meios porosos, nos quais podem se deslocar por meio da difusão (o soluto se desloca em soluções de maior concentração para menor concentração) ou por advecção (os solutos dissolvidos são carregados pela água em movimento) associados a fenômenos de dispersão, atenuação ou retardo. O autor supracitado explica que o transporte dos

contaminantes no meio físico é influenciado pelas características do solo residual e da zona saturada do lençol freático, das características litológicas e dos mecanismos de formação dos aquíferos. Dependendo da porosidade e da permeabilidade das rochas, a pluma de contaminação pode tanto se deslocar e se alojar facilmente em rochas de alta porosidade e permeabilidade como podem ser retida por rochas ou materiais de baixa permeabilidade, que funcionam como obstáculos para o trajeto dos contaminantes no meio físico. Além das características mecânicas e físicas, a percolação dos contaminantes é também influenciada por fenômenos químicos, físico-químicos e biológicos que podem retardar o transporte de íons desses componentes no solo por meio de processos de adsorção, precipitação e intrusão. Esses processos se associam principalmente aos aspectos hidrogeológicos e podem determinar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação gerada pelo transporte dos poluentes no solo e nos substratos rochosos.

Desta forma, a técnica do Caminhamento Elétrico é um instrumento de investigação que auxilia na remediação da área ao analisar os mecanismos de transporte da pluma no meio e o risco de contaminação do aquífero, assim como a amostragem e análise de solos e águas subterrâneas. Portanto, é necessária a realização de ensaios geofísicos e demais métodos de investigação a fim de direcionar as etapas seguintes de gerenciamento das áreas contaminadas através da remediação e monitoramento das plumas de contaminação gerados pela degradação dos resíduos sólidos em aterros e outros lugares destinados à disposição final desses resíduos, com o intuito de prevenir e minimizar os danos que esses contaminantes possam causar no meio ambiente e na saúde pública. Todavia, a aplicação dos métodos geofísicos ainda são pouco utilizados no gerenciamento de áreas contaminadas, o que torna importante a realização de pesquisas e trabalhos com o uso destes métodos para o âmbito ambiental.

O caso analisado pelo seguinte trabalho é focado nos potenciais impactos ambientais possivelmente apresentados pelo Antigo Aterro do município de São Carlos, anteriormente localizado na Fazenda Guaporé. O aterro era o principal destino final dos resíduos sólidos produzidos desse município até a sua desativação em 2013, quando se iniciaram as operações do Novo Aterro da Rodovia Luiz Augusto de Oliveira (CETESB, 2013). A importância do

estudo implica na análise do risco de contaminação para a comunidade que situa próxima à área de estudo, pois mesmo desativados os empreendimentos podem acarretar na produção de contaminantes e precisam ser frequentemente avaliados.

2. OBJETIVOS

A presente pesquisa visa determinar eventuais plumas de contaminação no Aterro Sanitário de São Carlos através do processamento de dados obtidos por meio de ensaios geofísicos de eletrorresistividade usando a técnica do caminhamento elétrico, obtendo uma investigação 2D dos materiais em subsuperfície.

3. CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização e Características Gerais da Área

De acordo com Giacomeli e Sardinha (2009?), o município de São Carlos encontra-se situado na região central do estado de São Paulo (Figura 1), localizado entre as coordenadas 47° de Longitude Oeste e 22° de Latitude Sul. A cidade de São Carlos encontra-se próxima às cidades de Analândia, Itirapina, Brotas, Ribeirão Bonito, Ibaté, Araraquara, Américo Brasiliense, Santa Lúcia, Rincão, Luís Antônio, Santa Rita do Passa Quatro e Descalvado.

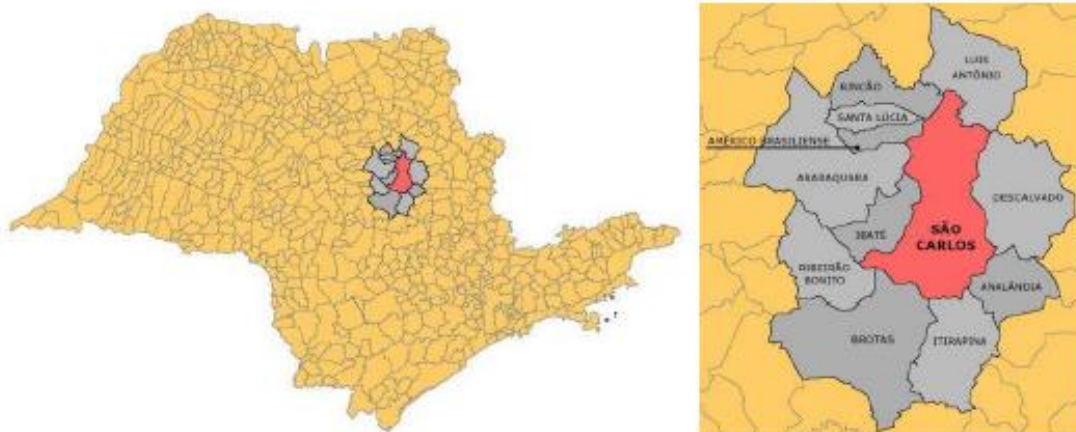


Figura 1. Localização do município de São Carlos no Estado de São Paulo (Giacomeli e Sardinha, 2009?).

O município tem área de 1.140 km² com área urbana de 68,45 km², além de possuir valores de crescimento demográfico de 2,4% ao ano e índice de desenvolvimento humano (IDH) de 0.841. Segundo os dados do IBGE (2016), a população estimada em 2016 foi de 243.765 habitantes, sendo que em 2010 este valor foi de 221.950 habitantes com Densidade Demográfica de 195,15 hab/km².

3.2 Aterros Sanitários de São Carlos

De acordo com Giacomeli e Sardinha (2009?), no ano de 2008 o município de São Carlos teve a produção de 124,4 ton/lixo/dia equivalente a 3732 toneladas de lixo por mês, o que correspondia a aproximadamente 568 gramas de lixo por habitante diariamente. Constatou-se que houve um aumento de 1,7% na produção de resíduos sólidos em relação ao ano de 1998, ano no qual a produção foi de 2200 toneladas de lixo por mês com produção diária de 470 gramas por habitante. O gráfico da Figura 2 mostra que a maior porção dos resíduos sólidos domiciliares produzidos pelo município de São Carlos era composta por matéria orgânica (59,8%), seguida por materiais diversos (outros) como fraldas, madeiras, panos, tecidos, etc., correspondentes a 20,09% dessa produção. Dentre esses resíduos sólidos produzidos, os que poderiam ser reutilizados seriam os materiais orgânicos (59,8%) por meio da compostagem e os materiais possíveis de serem reciclados como papel e papelão (6,44%), Tetra Pak (0,94%), vidro (1,67%), metal e alumínio (1,31%).

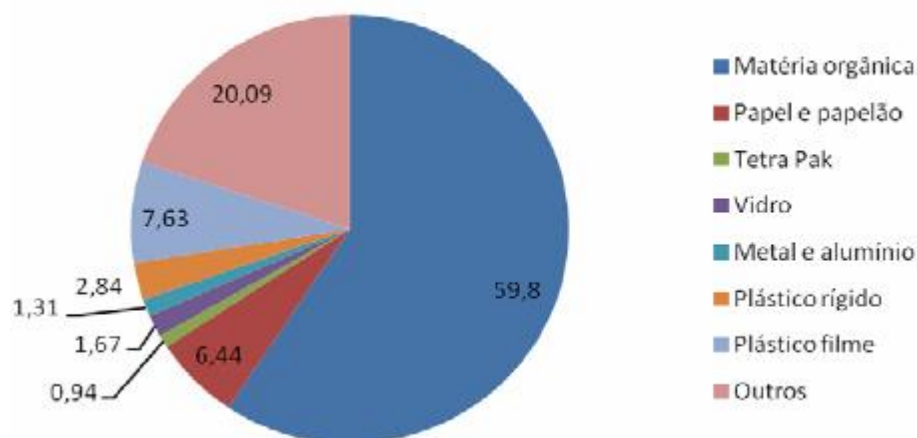


Figura 2. Gráfico do Percentual da composição da massa de resíduos sólidos domiciliares produzidos pela cidade de São Carlos (GIACOMELI & SARDINHA, 2009?).

Giacomeli e Sardinha (2009?) explicam que antigamente os resíduos sólidos gerados pelo município de São Carlos eram dispostos em um lixão situado próximo ao Posto Castelo na Rodovia Washington Luiz no Sítio Santa Madalena, estabelecido no km 2 de uma antiga estrada entre São Carlos e o município de Analândia. A área do lixão foi operada por 17 anos até outubro de 1996, quando a prefeitura de São Carlos passou a ser responsável apenas por sua manutenção e não viabilizou mais essa área como o destino final dos resíduos sólidos domiciliares.

Posteriormente, a disposição final dos resíduos sólidos desse município foi transferida para o antigo aterro sanitário da Fazenda Guaporé (Figura 3), sendo este usado como área de estudo do Trabalho de Conclusão de Curso. A localização do antigo aterro sanitário de São Carlos encontrava-se situada a 15 km do centro da cidade de São Carlos, localizado precisamente nas coordenadas 21°57'54.98" de latitude sul e 47°54'1.04" de longitude Oeste. Este Aterro Sanitário possuía uma área total de 10.63 hectares e alcançou uma quantidade diária de resíduos sólidos de 145 a 150 toneladas. No ano de 2008, foram feitas obras de abertura de uma nova célula devido à saturação do aterro. Atualmente esse aterro apresenta-se encerrado, tendo sido substituído pelo novo aterro sanitário de São Carlos.



Figura 3. Foto do Antigo Aterro de São Carlos da Fazenda Guaporé.

Segundo o Schalch et.al. (2009), o novo aterro sanitário de São Carlos localiza-se no Km 162 da Rodovia Luiz Augusto de Oliveira, SP-215, e possui uma área de 565.685,33 m². Esse aterro situa-se a oeste da malha urbana do município de São Carlos e sua localização é próxima à divisa com os municípios de Ribeirão Bonito e Ibaté. Segundo os estudos realizados, esse aterro tem a vida útil mínima de cerca de 22 anos com a capacidade de receber 1.944.502 toneladas de resíduos sólidos domiciliares em um volume aproximado de 2.798.192 m³, uma vez que o município de São Carlos produz 160 toneladas de resíduo sólido por dia e que pode aumentar para 320 toneladas diárias no ano de 2032.

3.3 Geologia Regional

Em termos geológicos, Schalch et.al. (2009) descreve o aterro de São Carlos como sendo situado no Nordeste da Bacia do Paraná. De acordo com Milani et.al. (2007), a Bacia do Paraná é uma bacia intracratônica localizada no continente sul-americano, situada nos territórios do Brasil meridional, leste do Paraguai, nordeste da Argentina e porção norte do Uruguai, totalizando uma área de cerca de 1,5 milhão de quilômetros quadrados (Fig.4). A bacia possui cerca de 5000 metros de espessura preenchida por sedimentos do Paleozóico e Mesozóico além de coberturas cenozóicas e derrames basálticos (SCHNEIDER et. al., 1974).

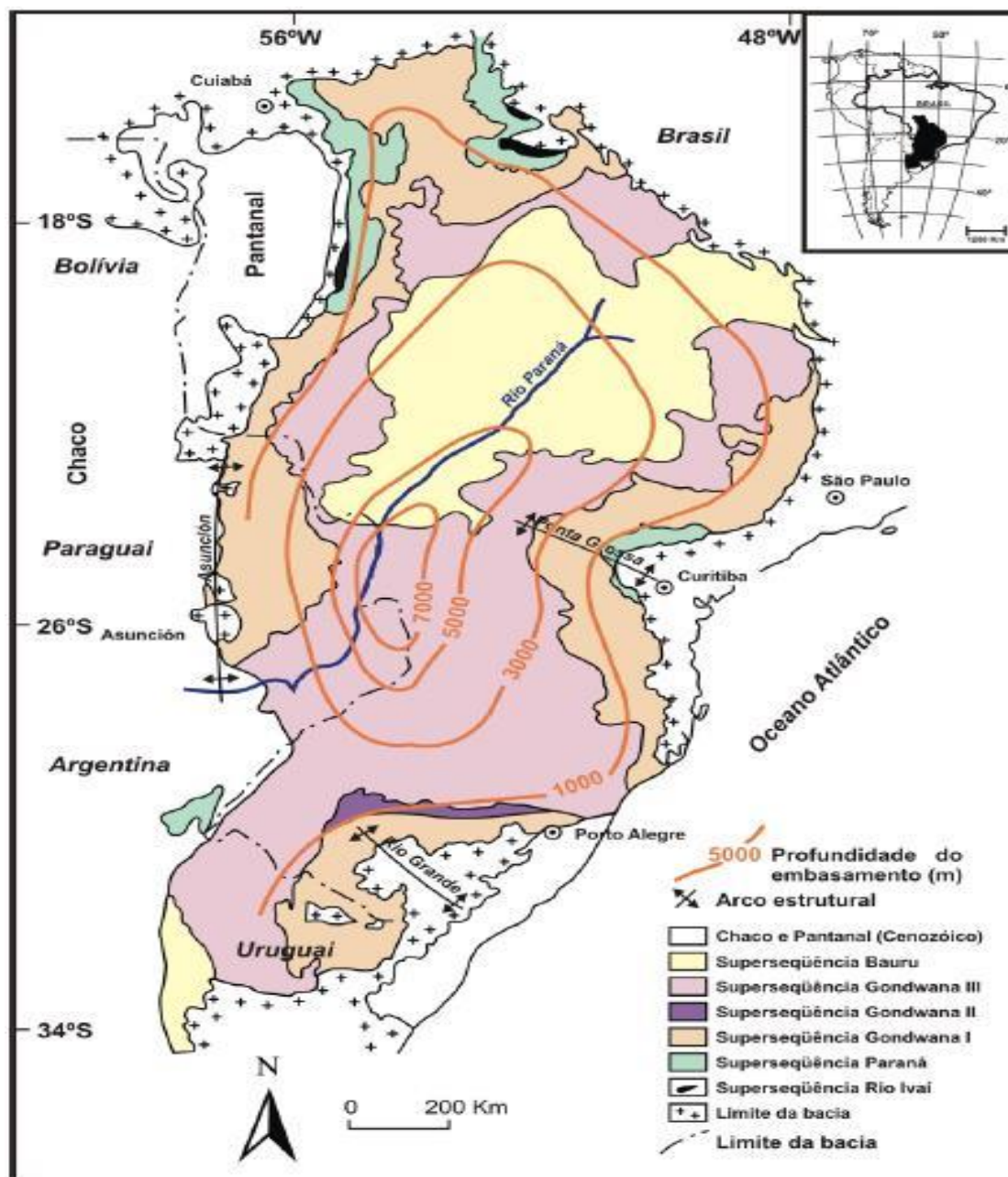


Figura 4 - Mapa Geológico simplificado da Bacia do Paraná, com referências geográficas e profundidade do embasamento. Extraído de Milani (1997).

A estratigrafia regional presente na borda nordeste da Bacia do Paraná é descrita por Yamada e Gonçalves (2007) como composta por unidades litológicas que datam do Paleozóico

ao Cenozóico. As unidades do Paleozóico são representadas pelo Grupo Tubarão (Carbonífero) e pelas unidades Permianas do Grupo Estrada Nova e das Formações Corumbataí e Irati. Por sua vez, o Mesozóico é representado pelas unidades das Formações Botucatu e Pirambóia do Período Jurássico, pela Formação Serra Geral do Cretáceo Inferior e pelo Grupo Bauru do Cretáceo Superior. Por último, ocorreu a sedimentação de arenitos, cascalhos, argilas e vegetais fósseis durante o Pleistoceno, seguidamente dos depósitos sedimentares de areia, cascalho e argila do Holoceno.

A tabela 1 apresentada por Schalch et.al. (2009) indica a coluna estratigráfica da Bacia do Paraná presente no Estado de São Paulo na região de São Carlos. Regionalmente a região é caracterizada por um espesso pacote de rochas sedimentares Cenozóicas e Mesozóicas associadas a intrusões das rochas magmáticas básicas da Formação Serra Geral e às coberturas cenozóicas de aluviões e sedimentos indiferenciados.

ERA	PERÍODO	GRUPO	FORMAÇÃO
Cenozóico	Quaternário		Aluviões (Qa)
			Sedimentos indiferenciados (Qi)
Mesozóico	Cretáceo	Grupo Bauru	Formação Adamantina (Ka)
	Jurássico/ Triássico	Grupo São Bento	Formação Serra Geral (Ksg) Formação Botucatu (JKb) Formação Pirambóia (TrJp)
Paleozóico	Permiano Superior	Grupo Passa Dois	Formação Corumbataí (Pc)
	Carbonífero	Grupo Tubarão	Formação Irati (Pi)
			Formação Tatui (Ptt)
			Formação Itararé (Cpi)
			Formação Aquidauana (Cpa)
Proterozóico	Pré-Cambriano	Pinhal / Araxa	

Tabela 1- Coluna Estratigráfica da Bacia do Paraná no Estado de São Paulo na região de São Carlos (Schalch et.al., 2009).

Quanto à geologia estrutural, O arcobouço tectônico da Bacia do Paraná é descrito por Siqueira (2011) como sendo marcado por grandes lineamentos estruturais orientados nas direções preferenciais NW-SE, NE-SW e E-W, sendo estas associadas a reativações de falhas do embasamento durante a evolução da bacia. Além dos lineamentos e das zonas de falha, a Bacia do Paraná também apresenta altos estruturais, que são em alguns casos associados aos grandes lineamentos regionais, cuja formação dos altos estruturais é provavelmente atribuída às reativações desses lineamentos.

O Mapa do Arcabouço estrutural da Bacia do Paraná apresentado por Fernandez (2014) da Figura 5 indica os numerosos lineamentos de direção NW-SE e NE-SW correspondentes às reativações tectônicas proterozóicas da bacia em conjunto com os lineamentos de direção E-W, além de indicar importantes feições estruturais como o Arco do Rio Grande, a Sinclinal de Torres, o Domo de Vargeão, o Arco de Ponta Grossa e o Domo de Araguaiana.

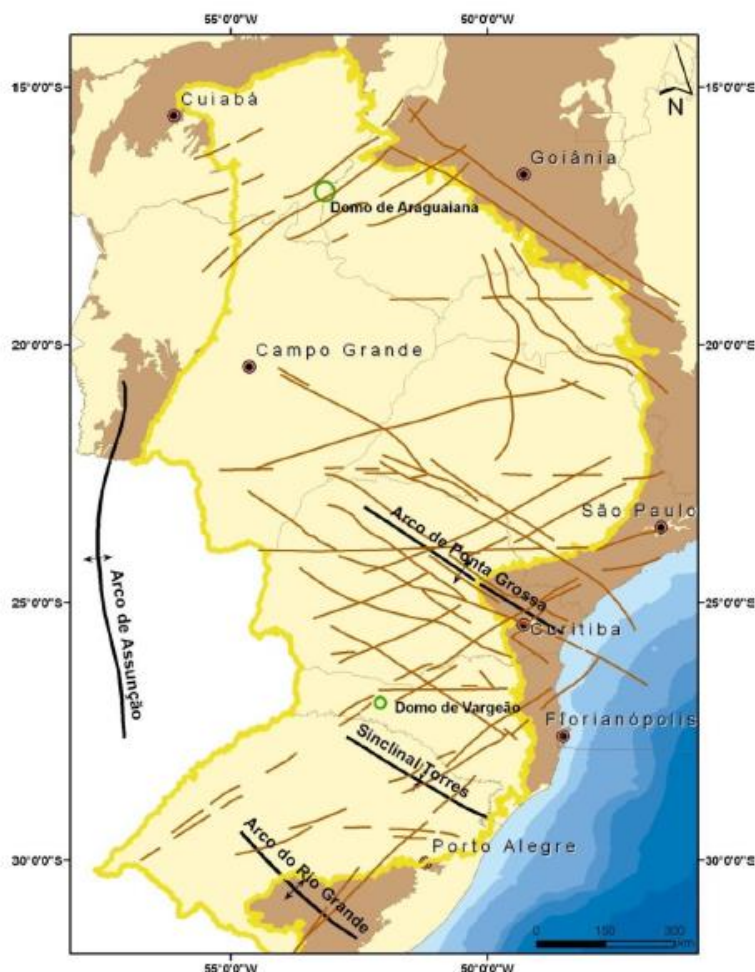


Figura 5. Arcabouço estrutural da Bacia do Paraná (Zalán et.al., 1990, apud. Fernandez, 2014).

3.4 Geologia Local

De acordo com Giacomeli e Sardinha (2009?), a geologia local de São Carlos é caracterizada, na ordem da base para o topo, pelos arenitos das Formações Pirambóia e Botucatu, pelas rochas básicas da Formação Serra Geral (Grupo São Bento) e pelas rochas do Grupo Bauru. Na região de São Carlos, a unidade litológica predominante do Grupo Bauru é a Formação Adamantina, a qual é composta por arenitos de granulação fina a muito fina alternadas por argilitos, siltitos e arenitos lamíticos (Schalch et.al., 2009). Por sua vez, Yamada & Gonçalves (2007) explica que, além das unidades estratigráficas mencionadas, o município de São Carlos também manifesta afloramentos da Formação Itaqueri e depósitos correlatos das

Serras de São Carlos e Santana em conjunto com sedimentos Cenozóicos, depósitos aluvionares associados à rede de drenagem, depósitos coluvionares e eluviões. O Perfil Geológico da Figura 6 expõe que o Município de São Carlos situa-se sobre o Grupo Bauru (Cretáceo Superior da Bacia do Bauru). Sotopostas a esse grupo, as Formações Pirambóia e Botucatu encontram-se entremeadas a um corpo intrusivo de rochas basálticas da Formação Serra Geral.

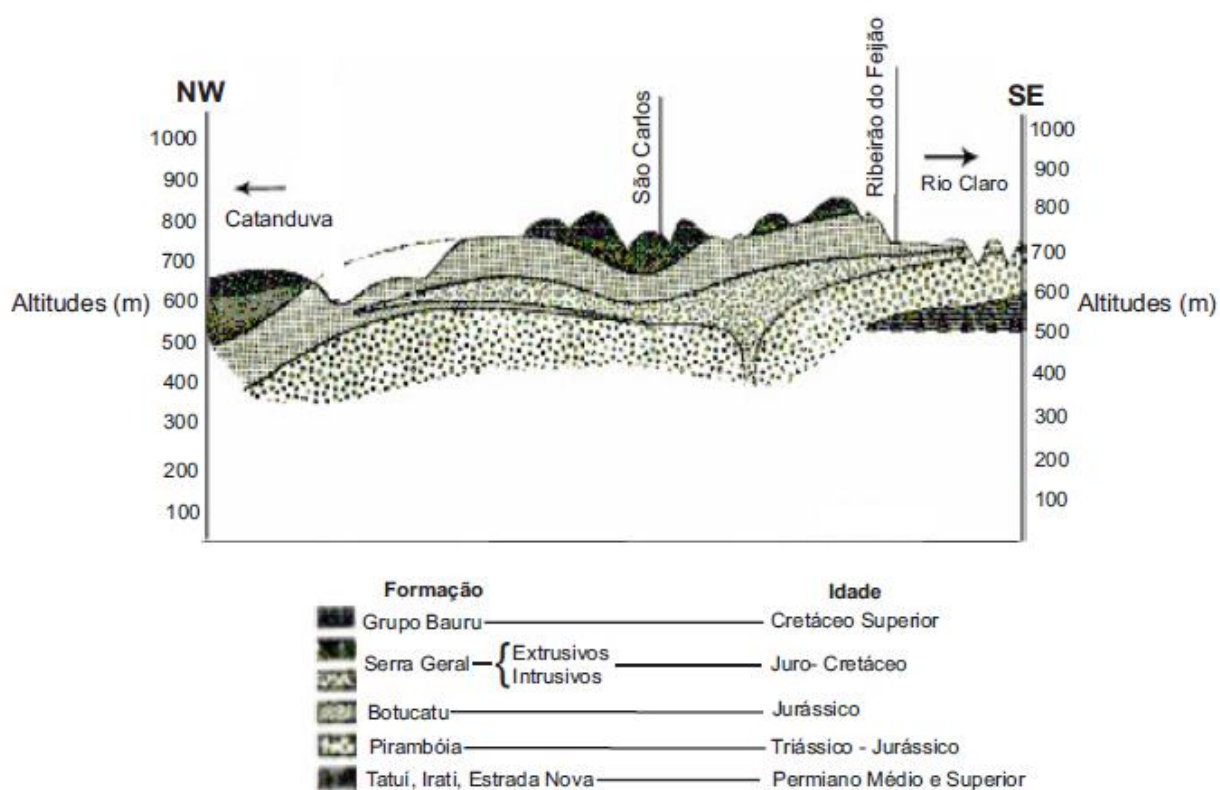


Figura 6. Perfil Geológico da região do município de São Carlos a Catanduva (YAMADA & GONÇALVES, 2007).

A Formação Pirambóia é descrita por Schneider et.al. (1974) como sendo atribuída ao período Triássico e é constituída por arenitos esbranquiçados, amarelados ou avermelhados de granulometria média a muito fina com grãos subarredondados intercalados com camadas de argilito e siltito, cujas estruturas mais comuns são a estratificação cruzada planar e acanalada e estratificações plano –paralelas.

A Formação Botucaru é descrita pelos autores supracitados como datada do período Juro-Cretáceo e é composta por arenitos avermelhados de granulometria fina a média de grãos foscos bem arredondados, sendo que em alguns afloramentos há a ocorrência de arenitos argilosos mal selecionados na base da formação. Schneider et.al. (1974) descreve a Formação Serra Geral como sendo correspondente a uma sequência de derrames basálticos intercalados com lentes e camadas arenosas. Suas rochas máficas são de composição toleítica de textura afanítica com cores cinza- escura com amígdalas no topo e juntas verticais e horizontais.

O Grupo Bauru é descrito por Schalch et.al. (2009) como marcado pelo soerguimento epirogênico em toda a Plataforma Sul Americana no território brasileiro após o término dos derrames de rochas básicas da Formação Serra Geral, o qual determinou o fim dos eventos deposicionais e vulcânicos generalizados na Bacia do Paraná. Por outro lado, a porção Norte da Bacia manifestou-se como uma área negativa que causou uma fase de embaciamentos localizados na região. Durante o Cretáceo Superior, sedimentos do Grupo Bauru foram depositados nessas áreas deprimidas em sobreposição as rochas basálticas do Planalto Ocidental em grande parte do Estado de São Paulo.

No caso da Formação Itaqueri observada por Yamada & Gonçalves (2007), esta é descrita como uma unidade litoestratigráfica predominantemente composta por arenitos imaturos de granulometria fina a conglomerática com espessura que dificilmente transcende 30 metros na região. Além dessas unidades, os autores citados assumem que existem, em sub-superfície, centenas de metros de rochas sedimentares das formações paleozoicas pertencentes à Bacia do Paraná sobrepostas ao embasamento cristalino Pré-Cambriano. Assim como o perfil geológico da Figura 6, o Mapa Geológico da Região de São Carlos da Figura 7 também indica a predominância das rochas sedimentares do Grupo Bauru e das Formações Botucatu e Pirambóia, além de diversas intrusões das rochas básicas da Formação Serra Geral.

3.5 Recursos Hídricos

3.5.1 Águas Superficiais

Os aspectos hidrográficos da cidade de São Carlos descritos por Yamada e Gonçalves (2007) são correspondentes às Bacias do Monjolinho e do Feijão. A Bacia do Monjolinho é composta pelos córregos do Monjolinho, Mineirinho, Gregório, Tijuco, Medeiros, Lazarini, Água Quente e Água Fria. Esses córregos fluem no sentido E-W e são as principais drenagens da área urbana do município. A jusante da bacia recebe todo o esgoto da cidade sem passar por um tratamento sanitário, ao passo que a montante existe um ponto importante de captação no manancial do Espraiado para o abastecimento de água da cidade. Por outro lado, a Bacia do Feijão é responsável por 40% do abastecimento do município e é localizada na APA Corumbataí, além de ser uma área de recarga do Aquífero Botucatu.

3.5.2. Águas Subterrâneas

A hidrogeologia do município de São Carlos é caracterizada por mananciais sub-superficiais rasos e profundos, cujos aquíferos presentes são os aquíferos de Botucatu (Subsistema do Aquífero Guarani), Itaqueri e Serra Geral. O Aquífero Botucatu é determinado como um aquífero predominantemente intergranular livre e confinado pertencente às Formações Botucatu e Pirambóia.

O Aquífero Serra Geral caracteriza-se como um aquífero fissural com anisotropia acentuada como resultado da intensa variação dos parâmetros hidráulicos expostos pelas rochas ígneas básicas. Esse aquífero é considerado um dos mais explorados da região em conjunto com o aquífero Guarani, cuja exploração é feita por meio de poços parcialmente revestidos. Contudo, apresenta baixa produção e excessiva vulnerabilidade às contaminações bacteriológicas derivadas das fossas sépticas e dos vazamentos das redes de esgoto.

Por último, o Aquífero Itaqueri é definido como um aquífero livre com espessura, capacidade e áreas de ocorrência restringidas, cujo potencial de aproveitamento é composto por poços rasos de baixa produção. Seu contato inferior é caracterizado pela transição abrupta das

unidades sedimentares com as rochas basálticas, o que proporciona a geração de várias nascentes alimentadas por esse aquífero na área urbana de São Carlos.

4. Conceitos Teóricos

4.1 Aterro Sanitário

Aterros são definidos pela CETESB (2010) como uma forma de disposição dos resíduos sólidos no solo com riscos mínimos à saúde pública e ao meio ambiente. Esse tratamento é feito por meio de técnicas de engenharia que confinam esses resíduos na menor área e volume possíveis ao cobri-los periodicamente com camadas de terra a cada jornada de trabalho, cuja compactação pode ser feita através de valas ou de trincheiras.

Os tipos principais de aterros são os aterros sanitários e os aterros controlados. Os aterros sanitários são caracterizados por Moreira e Braga (2008) como sendo revestidos com uma membrana impermeável que impossibilita a passagem de chorume e elementos contaminantes, ao passo que os aterros controlados manifestam disposição direta dos resíduos sólidos sobre o solo. Além do chorume, os resíduos sólidos contidos nesses aterros podem gerar plumas de contaminação com outros grupos químicos poluentes, dentre eles (MOREIRA, BRAGA, FRIES, 2009, p.285):

- Matéria orgânica dissolvida, expressa pela demanda química de oxigênio ou carbono orgânico total, incluindo CH_4 , ácidos graxos voláteis e compostos refratários como húmicos e fúlvicos;
- Macrocomponentes inorgânicos como Ca, Mg, Na, K, NH_4^+ , Fe, Mn, Cl, SO_4^{+} e HCO_3^- ;
- Metais pesados: Cd, Cr, Cu, Pb, Ni e Zn;
- Compostos orgânicos derivados do petróleo, que incluem hidrocarbonetos aromáticos, fenóis e compostos clorados alifáticos;
- Compostos de importância secundária e baixa concentração como B, As, Se, Ba, Li, Hg e Co.

Com o intuito de proteger de maneira adequada os recursos hídricos superficiais e subterrâneos e evitar impactos ambientais causados por esses contaminantes, os aterros sanitários obedecem às normas estabelecidas pela NBR 13896, a qual determina as condições mínimas necessárias para o projeto, implantação e operação dos aterros sanitários não perigosos (CANDIANI & MOREIRA, 2015).

De acordo com Reis (2001), a configuração dos aterros sanitários é dividida em setores de preparação, de execução e em setores concluídos, como mostrado na Figura 8. Em geral, os setores são desenvolvidos concomitantemente ao longo da operação dos aterros, ao passo que em alguns casos cada setor é efetuado um de cada vez. Durante a preparação da área, são realizados a impermeabilização e o nivelamento do terreno em conjunto com a execução de obras de drenagem para a captação do chorume e do percolato e sua condução ao tratamento e a construção de vias de circulação. É exigido que seja feita a construção de uma cerva viva nos limites do aterro com o objetivo de evitar e reduzir a proliferação de odores e a poluição visual nas comunidades vizinhas.

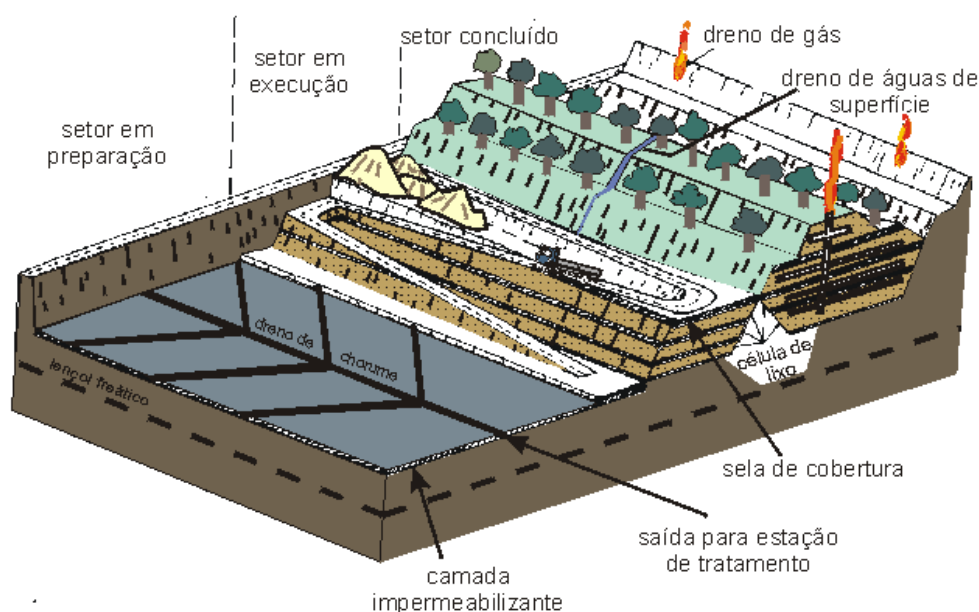


Figura 8. Figura esquemática da operação em um aterro sanitário (REIS, 2011).

No setor de execução, os resíduos sólidos são devidamente selecionados de acordo com as suas características para serem depositados separadamente, o que inclui o processo de pesagem do material a fim de acompanhar a quantidade de suporte do aterro. No caso dos resíduos produtores de material percolado, é feita o revestimento dos resíduos por meio de uma camada selante. No momento em que a capacidade de disposição de resíduos de um setor é atingida, efetua-se a revegetação do setor e se faz a deposição dos resíduos sólidos em outro setor. Durante as operações de disposição e após a conclusão dos setores, é feita a queima dos gases produzidos pela decomposição dos resíduos e a captação dos fluídos percolados, além de obras de drenagem das águas pluviais serem realizadas em conjunto.

Posteriormente a etapa de conclusão dos setores, se faz o monitoramento contínuo e permanente dessas unidades com a finalidade de avaliar as obras de captação dos percolados e as obras de drenagem das águas superficiais, além da avaliação do sistema de queima dos gases produzidos e a eficiência da execução das etapas de revegetação. Desta forma, o monitoramento é feito por meio de técnicas de piezometria, poços de monitoramento, inclinômetro, marcos superficiais e controle de vazão.

5. Materiais e Métodos

5.1 Metodologia dos Ensaio Geofísicos

Os ensaios de caminhamento elétrico feitos no Antigo Aterro Sanitário da Fazenda Guaporé foram realizados pelos pesquisadores do Departamento de Geologia Aplicada da Universidade Estadual Paulista "Júlio Mesquita Filho" (UNESP) do campus de Rio Claro em outubro de 2006 em uma área com coordenadas UTM de 190925 Longitude Oeste e 7559904 Latitude Sul da Zona UTM 23 e com cotas de 810 metros.

Os ensaios de Caminhamento Elétrico executados neste Aterro foram efetuados ao longo de 5 linhas de investigações, como ilustrado no mapa da Figura 9. Posteriormente esses dados foram processados no software Res2dinv V. 3.5 a fim de obter os modelos geoeletricos com os

valores reais de profundidade e resistividade, com base em modelos matemáticos relacionados ao método dos mínimos quadrados (COSME DA SILVA, 2008).

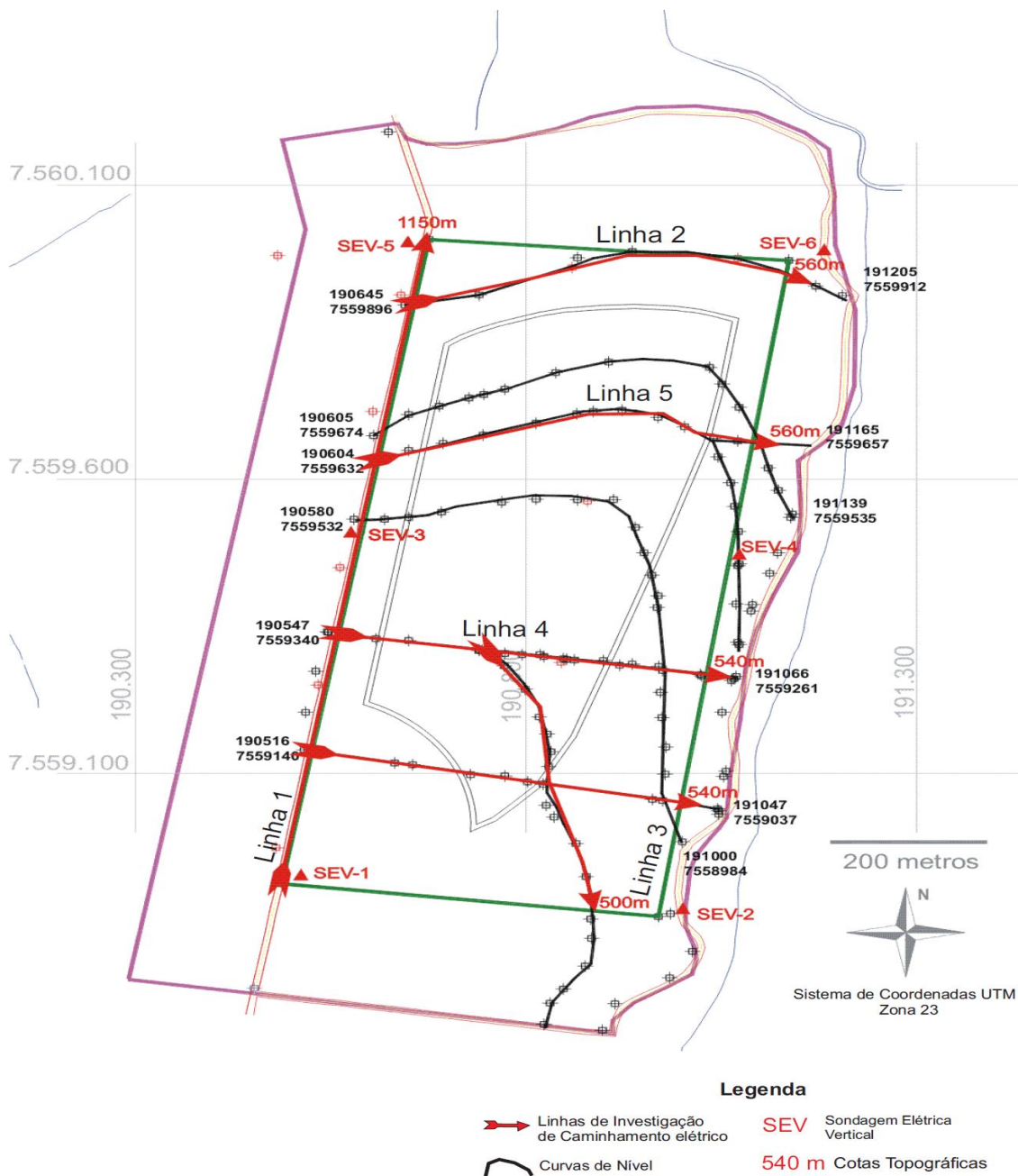


Figura 9. Mapa dos ensaios geoeletricos feitos no antigo aterro de São Carlos pelos pesquisadores da UNESP.



Além dos ensaios geoeletricos, também foram feitos diversos furos de sondagem a trado com o objetivo de analisar as unidades litológicas locais e ensaios de Sondagem Elétrica Vertical (SEV). No total foram feitos 13 furos de sondagem, cuja configuração é ilustrada no Mapa da Figura 10. Os dados obtidos através destes furos de sondagem foram também usados pela equipe de pesquisadores da UNESP para produzir o Mapa da Cota do Topo da Rocha Sã e o Mapa de Profundidade de Topo da Rocha Sã por meio do *software* Surfer. Apesar de ensaios de Sondagem Elétrica Vertical terem sido feitos, estes não serão discutidos, uma vez que o objetivo do seguinte trabalho é o de analisar os dados fornecidos através da Técnica do Caminhamento elétrico.

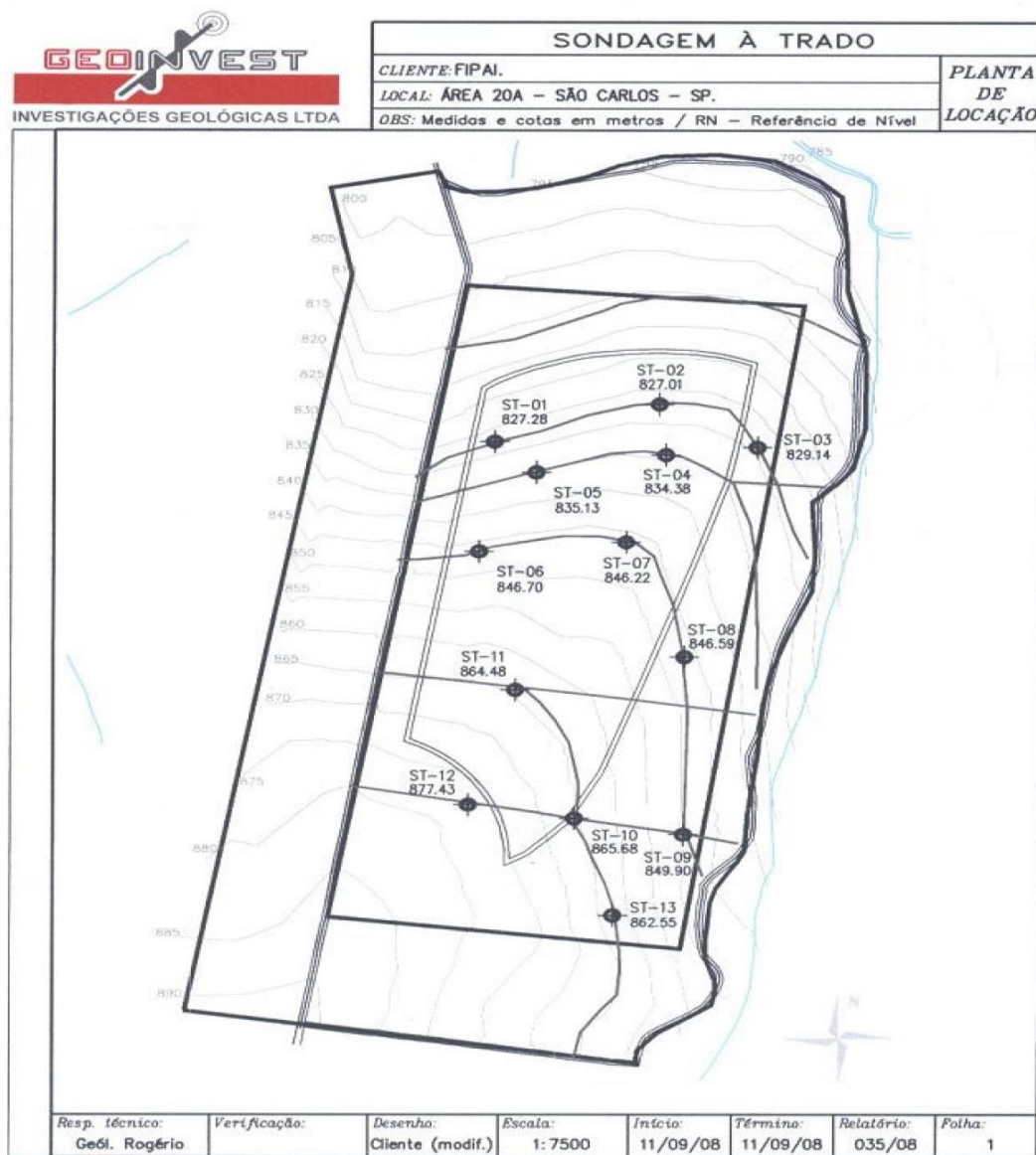


Figura 10. Localização dos furos de sondagem a trado feitos pela equipe de pesquisadores da UNESP no Antigo Aterro Sanitário da Fazenda Guaporé.

5.2 Método Geolétrico da Eletorresistividade

Segundo Laureano (2007), os métodos geolétricos são um dos grupos principais entre as técnicas de prospecção e exploração geofísica, os quais são usados principalmente na mineração, na geologia de engenharia, geologia ambiental e na hidrogeologia. Esses métodos

comportam uma variedade de técnicas de investigação, tais quais as técnicas da Sondagem Elétrica Vertical (SEV), do Caminhamento Elétrico (CE) e da Perfilagem Elétrica, além de uma ampla diversidade de arranjos de eletrodos (Schlumberger, Wenner, polo-dipolo, dipolo-dipolo, entre outros). Essa ampla diversidade de técnicas e arranjos confere aos métodos geoeletricos uma grande versatilidade em suas aplicações na investigação de vários parâmetros usados na caracterização geológica e hidrológica em áreas de disposição de resíduos.

Neste contexto, o método geoeletrico da eletroresistividade baseia-se na determinação das resistividades elétricas apresentadas pelas rochas ao longo do meio físico, que ocorre em função de suas composições mineralógicas, texturais e de suas disposições no meio (MOURA, MALAGUTTI FILHO, 2003). Borges (2002) cita a resistividade como um parâmetro físico que indica a medida da dificuldade que um material apresenta à passagem de uma corrente elétrica. Desta forma, a resistividade é equivalente ao inverso da condutividade, que por sua vez define a facilidade da qual a corrente elétrica propaga através de um dado material. A resistividade é comumente representada pela letra (ρ) e possui unidade de medida dada em Ohm.m, ao passo que a condutividade é designada pela letra (σ) e é dada em S/m, sendo a relação dessas variáveis expressa em:

$$\rho = \frac{1}{\sigma} \quad (1)$$

Com base nas características da definição de resistividade, Braga (2016), Bortolin (2009) e Borges (2002) descrevem a existência de uma relação entre a Lei de Ohm e o parâmetro da resistividade. Bortolin (2009) utiliza a Lei de Ohm como uma relação empírica que associa a intensidade de uma corrente elétrica (I) que se propaga por meio de um condutor com uma tensão (V) necessária para que ocorra essa corrente elétrica, a qual é expressa pela equação:

$$V = RI \quad (2)$$

Na qual a constante de proporcionalidade R é a resistência elétrica do material condutor, cuja unidade de medida é volt por ampère (V/A) ou Ohm (Ω).

De acordo com Braga (2016), a resistividade elétrica pode ser definida a partir do modelo de um condutor homogêneo de formato cilíndrico ou prismático com comprimento L e área transversal S (Figura 11).

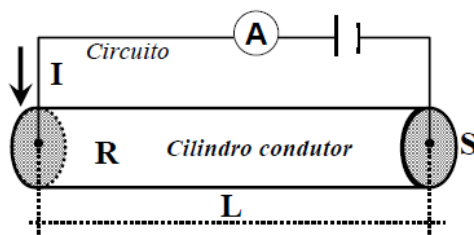


Figura 11. Relação resistividade e resistência em um cilindro condutor (BRAGA, 2016).

A Lei de Ohm define que a relação de resistividade (ρ) e da resistência (R) desse cilindro é determinada pela seguinte equação:

$$\rho = R \frac{S}{L} \quad (3)$$

Por conseguinte, o parâmetro da resistividade é o resultado do produto da resistência elétrica R (Ω) pela área da seção S (m^2) dividida pelo comprimento L (m), cuja unidade de medida no sistema SI é Ωm .

Braga (2016) explica que a aplicação do método da eletrorresistividade em campo resume-se na utilização de equipamentos capazes de introduzir uma corrente elétrica no subsolo em diferentes profundidades de investigação, com o objetivo de calcular as medidas de resistividade dos materiais geológicos de acordo com as profundidades analisadas. Os arranjos de campo principais desse método constam em termos generalizados de quatro eletrodos (AMNB) cravados na superfície do terreno, como ilustrado na Figura 12. O primeiro par de eletrodos (AB) tem a função de introduzir a corrente elétrica no subsolo, ao passo que se utiliza o segundo par (MN) para a medição da diferença de potencial resultante da passagem da corrente elétrica entre os pares de eletrodos.

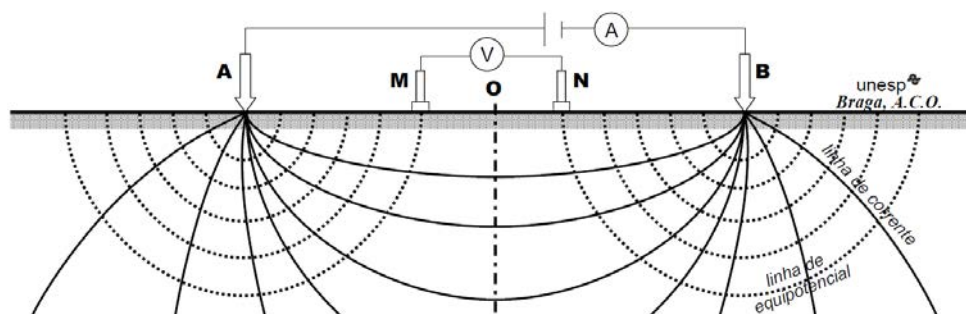


Figura 12. Diagrama da configuração tetraeletródica de campo do método da resistividade (BRAGA, 2016).

Desse modo, é possível calcular a resistividade do material investigado através das seguintes equações:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (4)$$

$$K = 2\pi \cdot \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)^{-1} \quad (5)$$

No qual ΔV indica a diferença de potencial, I equivale à corrente injetada pelos eletrodos de corrente e K corresponde ao coeficiente geométrico entre os quatro eletrodos ABMN.

Consequentemente, o uso do método da eletrorresistividade é dependente da potência ou capacidade de introdução da corrente elétrica pelo equipamento no solo em diferentes profundidades de investigação a fim de se calcular as resistividades dos materiais geológicos em vários níveis de profundidade.

Contudo, dado que o subsolo normalmente não se comporta como um meio homogêneo e consequentemente o campo elétrico é afetado pelas heterogeneidades dos materiais geológicos (Figura 13), as medidas obtidas são representadas por meio de uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material geológico definido para uma subsuperfície consideravelmente grande. Por conseguinte, essas medidas podem ser

expressas a partir da *resistividade aparente* (ρ_a) desses substratos, que é uma variável cuja medição expressa os resultados de alguns dos métodos geoeletricos e que servem de base para a interpretação final e, assim como a resistividade, também possui dimensão de Ωm .

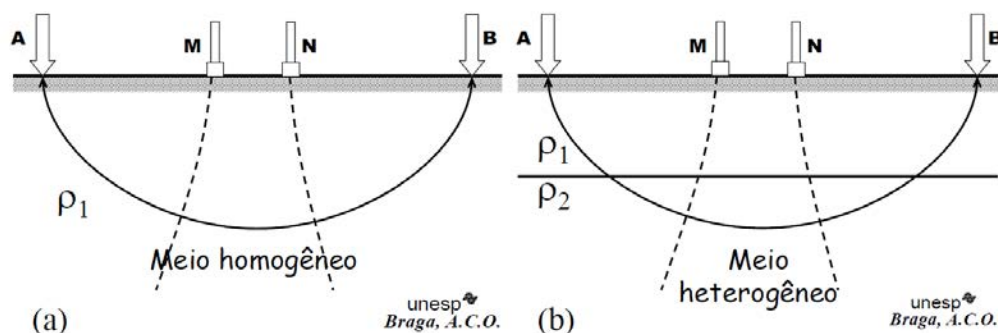


Figura 13. Parâmetros de resistividade em meios (a) homogêneos e (b) heterogêneos (BRAGA, 2016).

5.3 Técnica do Caminhamento Elétrico - Arranjo Dipolo-Dipolo

A técnica do Caminhamento Elétrico (CE) ou Imageamento Elétrico é descrita como uma técnica que permite a obtenção dos valores de resistividade aparente dos materiais em subsuperfície, sendo baseada na análise e interpretação da variação lateral dos parâmetros geoeletricos medidos na superfície do terreno ao longo de uma seção horizontal de profundidades pré-determinadas e aproximadamente constantes (BRAGA, 2016; BORTOLIN, 2009; GALLAS *et.al.*, 2001; MARCIELLI SANTOS, 2005).

Braga (2016) explica que essa técnica de investigação é feita através do espaçamento constante dos eletrodos AMNB em linhas de investigação com direção fixa, no qual o centro do arranjo AMNB se desloca com o desenvolvimento do ensaio a fim de se analisar as variações laterais dos parâmetros físicos em profundidades determinadas. De acordo com Gallas *et. al.* (2001), essas investigações são feitas ao longo de perfis, as quais produzem um estudo em planta com profundidades determinadas ou uma sequência de seções com diversas profundidades de investigação. A técnica do Caminhamento Elétrico pode ser aplicada por meio dos arranjos Schlumberger, Wenner, Polo-Polo, Polo-Dipolo, Dipolo-Dipolo, Gradiente,

entre outros, como mostrado nas Figuras 14, 15 e 16 (BRAGA, 2016; LAUREANO, 2007; GALLAS *et.al.*, 2001).

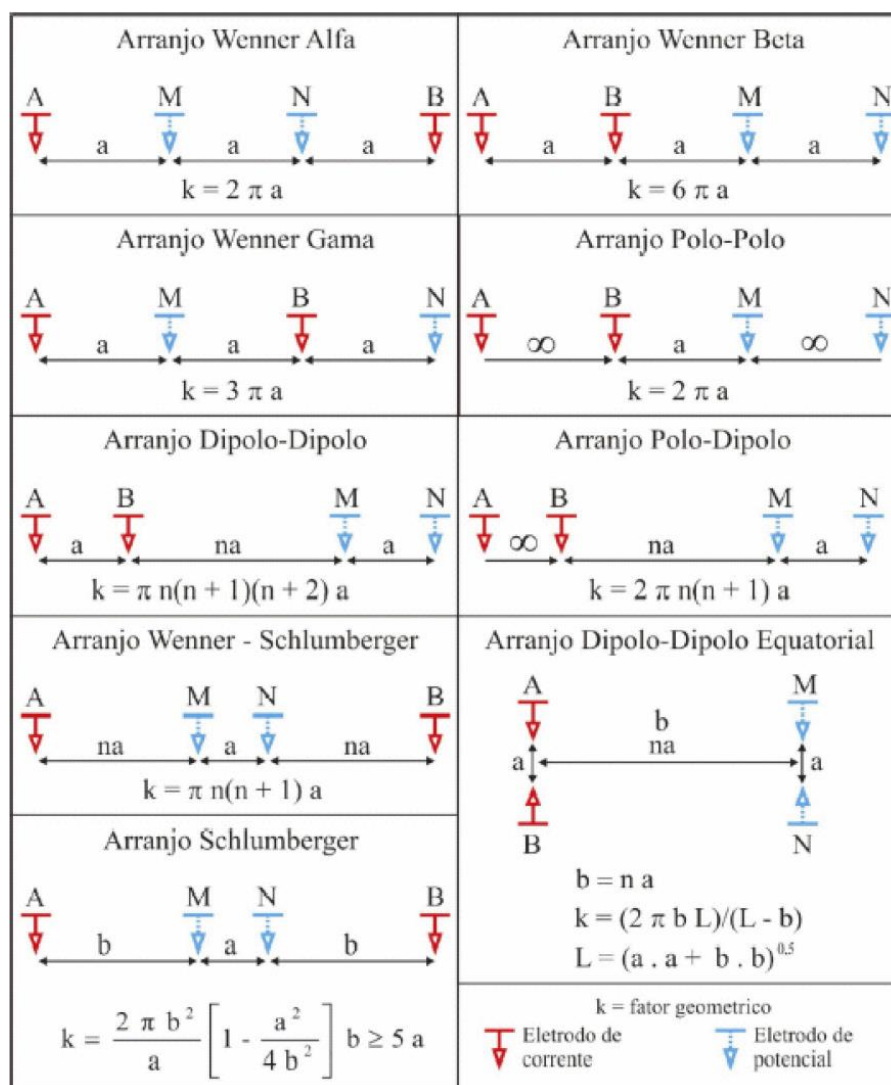


Figura 14. Principais arranjos de desenvolvimento e seus respectivos valores geométricos (LAUREANO, 2007).

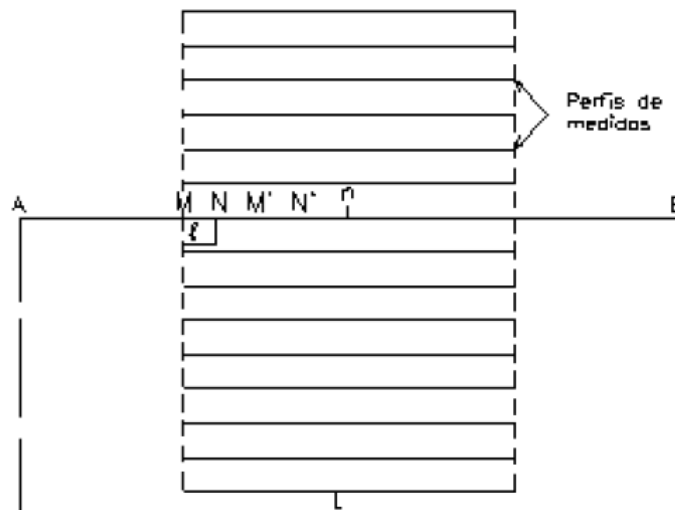


Figura 15. Configuração do Arranjo Gradiente (GALLAS *et.al.*, 2001).

No caso do arranjo dipolo-dipolo, Bortolin (2009) destaca alguns pontos positivos deste arranjo, dentre eles a simetria dos eletrodos que permite um correto posicionamento da anomalia geofísica em relação aos outros arranjos, a facilidade operacional em campo, a boa resolução lateral e os bons resultados obtidos em mapeamentos de estruturas verticalizadas. Por outro lado, o mesmo autor também menciona alguns pontos negativos desse arranjo, tais quais a forte influência das irregularidades da cobertura superficial, a baixa razão sinal/ruído conforme a distância de separação dos eletrodos aumenta e a ineficiência ao identificar estruturas horizontais.

O arranjo dipolo-dipolo é caracterizado por Borges (2002), Braga (2016), Gallas *et.al.* (2001) e Laureano (2007) por utilizar um par de dipolos AB para a injeção de uma corrente elétrica no subsolo e por um par de eletrodos MN de potencial ou recepção que se deslocam ao longo de uma linha com espaçamento constante, cuja relação de espaçamento é de $X=AB=MN$. Os centros dos eletrodos AB e MN não permanecem fixos na seção e seus espaçamentos entre si podem variar, além de que são usados vários dipolos MN de forma simultânea.

Conforme os eletrodos se deslocam ao longo da superfície, são registrados diferentes níveis de investigação (n) ou profundidades de investigação, em que n corresponde aos pontos

de intersecção das linhas que partem do centro dos dipolos AB com as linhas que partem dos dipolos MN em ângulos de 45° . Cada nível de investigação corresponde a cada dipolo MN e pode ter valores de $n=1,2,3,4$ e assim por diante. As profundidades de investigação aumentam com a distância R entre os dipolos AB e MN, na qual a profundidade teórica investigada seria equivalente à $R/2$. O Esquema da Figura 16 mostra a configuração do arranjo dipolo-dipolo, no qual se observa as relações de espaçamento dos eletrodos AB e MN segundo um sentido de caminhamento e as profundidades dos níveis de investigação adquiridos.

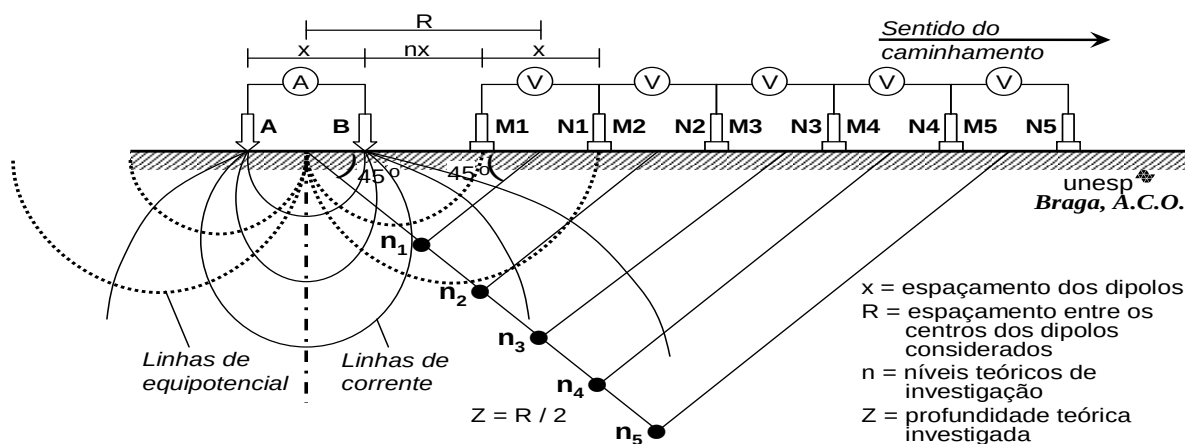


Figura 16. Esquema de campo do caminhamento elétrico – arranjo dipolo-dipolo. (BRAGA, 2016).

Na técnica do Caminhamento Elétrico, a resistividade aparente (ρ_a) é determinada por meio da equação, vista anteriormente na Equação 4 (BRAGA, 2016; BORGES, 2002; LAUREANO, 2007; GALLAS et.al., 2001):

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (6)$$

Onde o coeficiente K é determinado por:

$$K = 2\pi \cdot G \cdot x \quad (7)$$

Com:

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (8)$$

No qual K é o fator geométrico dependente da disposição dos eletrodos ABMN na superfície do terreno, x é o espaçamento dos dipolos AB e MN considerados e n é o nível de investigação correspondente (n=1,2,3...).

O sistema de plotagem dos parâmetros geoeletricos obtidos é feito através de uma projeção de 45° a partir dos centros dos dipolos AB e MN até o ponto médio entre os centros destes dipolos, como indicado na Figura 17.

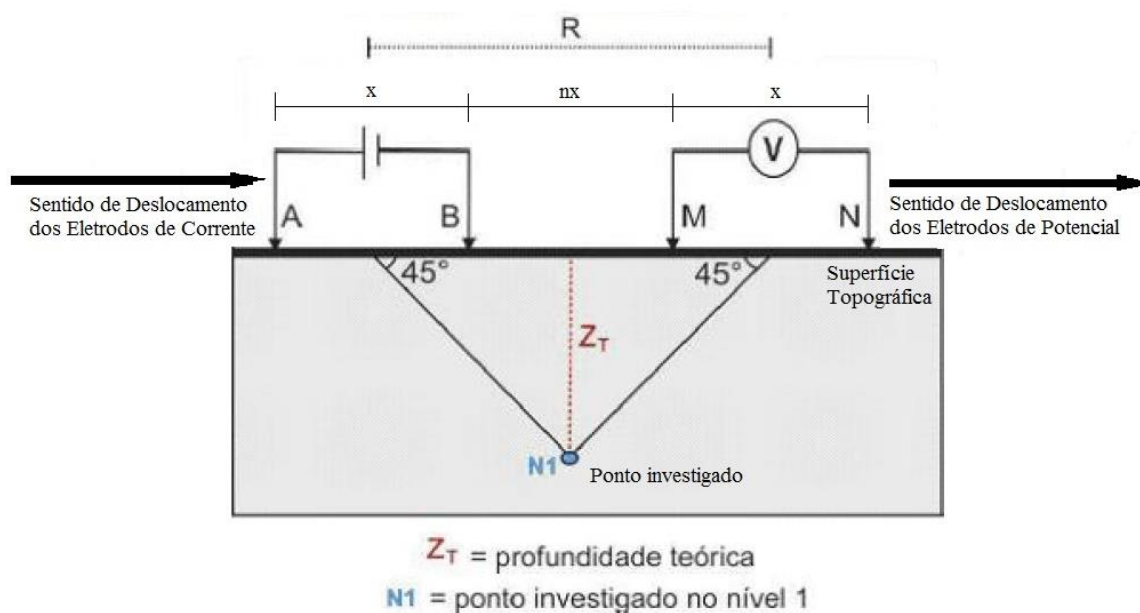


Figura 17. Esquema do sistema de plotagem das sondagens dipolares do arranjo dipolo-dipolo (Modificado de Laureano, 2007; Borges, 2002).

Neste caso, a profundidade teórica de investigação Z_t pode ser obtida ao aplicar a regra do triângulo retângulo na Figura 17, expressa pela relação (LAUREANO, 2007; BORTOLIN, 2009):

$$Z_T = \frac{R}{2} \quad (10)$$

Em que Z_T é a profundidade teórica de investigação e R representa a distância entre os centros dos dipolos AB e MN.

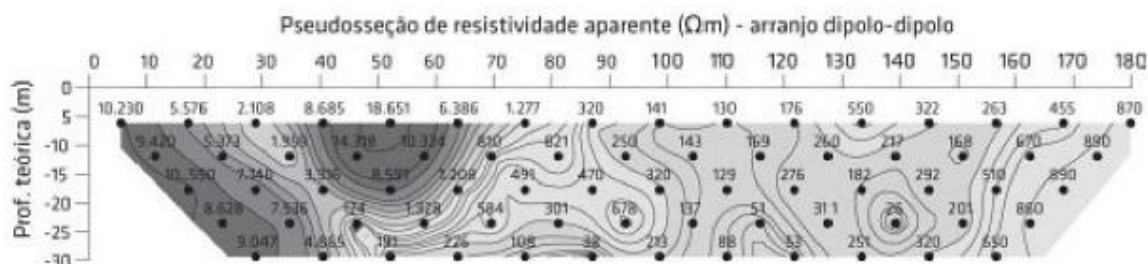
O resultado da plotagem de todos os parâmetros geoeletricos adquiridos por meio do perfil levantado é equivalente a uma seção da resistividade aparente do local estudado ou *pseudo-seção* (Figura 18), no qual são registradas as medidas das resistividades aparentes (ρ_a) de acordo com o avanço dos eletrodos na seção e com os níveis de investigação (BRAGA, 2016; BORGES, 2002; LAUREANO, 2007).



Figura 18. Esquema de plotagem dos pontos dos níveis de investigação em uma pseudo-seção de resistividades aparentes (LAUREANO, 2007).

Nos casos em que os ensaios são feitos em uma profundidade fixa, obtêm-se um perfil geoeletrico em 1D, ao passo que em seções com profundidades variadas são obtidos perfis 2D denominados de *imageamento geoeletrico* (Braga, 2016). Esses resultados são então usados em estudos que requerem a análise das mudanças laterais das estruturas geológicas, a exemplo da caracterização de falhas e fraturas, da prospecção de aquíferos e na avaliação da contaminação dos aquíferos por elementos contaminantes (MARCIELLI SANTOS, 2005). Os resultados obtidos podem ser expressos por meio de seções (em casos com mais de uma profundidade) como ilustrado na Figura 19 ou por meio de mapas (quando possui uma ou mais profundidades definidas), a exemplo do mapa da Figura 20.

a)



b)

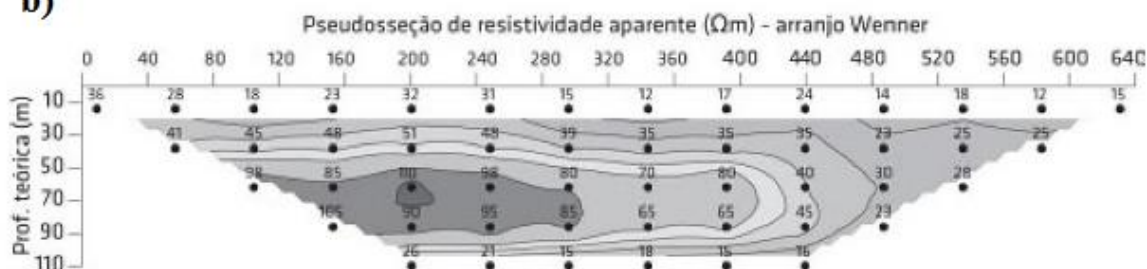


Figura 19. a) Pseudosseção de resistividade aparente do arranjo Dipolo-Dipolo; b) Pseudosseção de resistividade aparente do arranjo Wenner (BRAGA, 2016).

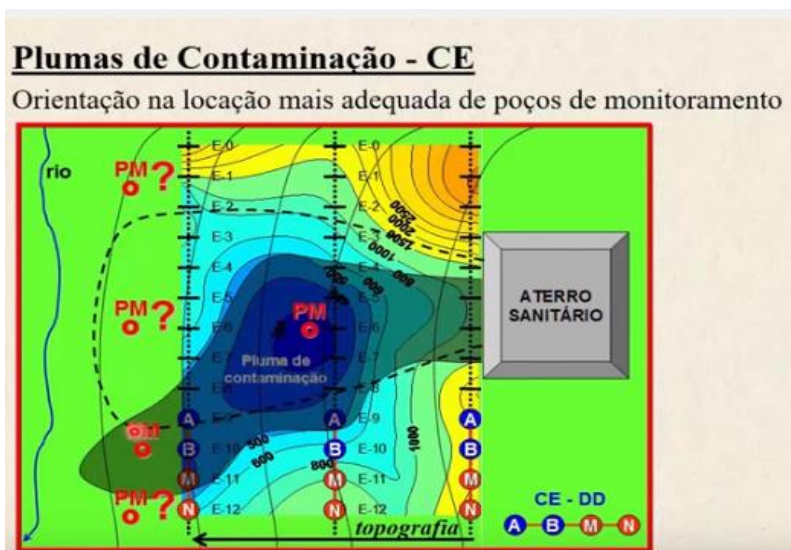


Figura 20. Exemplo de mapa de plumas de contaminação feito através do caminhamento elétrico (BRAGA, 2016).

5.4 Resistividades das Rochas

De acordo com Bortolin (2009), a resistividade elétrica é considerada como uma das propriedades fundamentais dos materiais geológicos, a qual pode ser utilizada para descrever seus estados de alteração, fraturamento, saturação e interpretação de litotipos sem a necessidade de perfurações. Na prática, a resistividade de uma rocha sofre influência de diversos fatores, dentre estes a resistividade dos minerais que compõem a parte sólida da rocha e dos poros preenchidos por líquidos ou gases, o teor de umidade, a porosidade, textura da rocha e o padrão de distribuição dos poros da rocha (BORTOLIN, 2009; LAUREANO, 2007; BRAGA, 2016).

Além destes parâmetros, Bortolin (2009) afirma que também pode haver variações na resistividade causadas por processos ocorrentes nos contatos dos líquidos presentes nos poros e na estrutura cristalina dos minerais, tais quais os fenômenos de adsorção de íons na superfície do retículo cristalino do mineral que pode diminuir a resistividade total das rochas. Desta forma, rochas e sedimentos de mesma composição podem apresentar valores de resistividade podem apresentar valores diferenciados de resistividade.

Outro fator que influencia na resistividade dos materiais é dependente do tipo de condutividade da corrente elétrica, dentre as quais podem ser por (BORTOLIN, 2009; MARCIELLI SANTOS, 2005; COSME DA SILVA, 2008):

- Condução eletrolítica ou iônica: ocorre pelo deslocamento de íons presentes na água contida nos poros e fissuras das rochas e do solo, de acordo com o tipo e quantidade dos íons.
- Condução eletrônica: ocorrem devido à presença de elétrons livres presentes em minerais condutores metálicos ou grafita.
- Condução dielétrica: ocorre geralmente em maus condutores ou em materiais isolantes, nos quais os elétrons atômicos afastam-se ligeiramente dos núcleos atômicos devido à influência de um campo elétrico externo e gera uma ligeira separação de cargas, o que resulta na geração de uma corrente de deslocamento formada pela polarização dielétrica do material.

Destas, Marcielli Santos (2005) e Cosme da Silva (2008) afirmam que a mais comum é a condutividade eletrolítica, seja pelo fato de que os minerais condutores raramente ocorrem em quantidades suficientes para elevar a condutividade eletrônica do meio como também a condutividade eletrolítica é altamente influenciada pela quantidade de água e salinidade do ambiente. Neste contexto, Braga (2016) comenta que os solos e rochas se comportam como condutores iônicos de resistividades muito variáveis, uma vez que estes possuem porosidade variante que podem ser ocupados total ou parcialmente por eletrólitos.

Os valores de resistividade também são variáveis de acordo com as características litológicas das rochas, dos minerais e dos solos (BORTOLIN, 2009; BORGES, 2002, BRAGA, 2016; LAUREANO, 2007). Borges (2002) afirma que rochas cristalinas com pouca porosidade apresentam geralmente valores altos de resistividade, ao passo que rochas sedimentares muito porosas ou rochas cristalinas muito fraturadas com alto teor de água ou com grande quantidade de minerais condutores adquirem medidas reduzidas de resistividade. Bortolin (2009) enfatiza neste contexto a questão da porosidade das rochas (intergranular, fissural ou vugular) dos diferentes tipos de rochas (sedimentares, ígneas, vulcânicas e calcáreas) e da textura das rochas com as resistividades apresentadas por estes tipos litológicos, a depender se os poros estão total ou parcialmente preenchidos por eletrólitos.

Contudo, Bortolin (2009) e Braga (2016) afirmam que a resistividade das rochas pode modificar devido a diversas condições geológicas, tais quais o grau de saturação e alteração por intemperismo da rocha, a condutividade da água, o tamanho dos grãos, o grau de metamorfismo, os efeitos tectônicos, entre outros, o que pode acarretar em um amplo conjunto de variações nas medições da resistividade em um mesmo tipo litológico. Por sua vez, Laureano (2007) acrescenta a questão da resistividade dos solos com o teor de água apresentado por estes. No caso de solos secos, ocorrem valores de resistividade muito elevados com ampla variação que podem não permitir a identificação do tipo de solo, enquanto que os valores de resistividade de solos saturados podem indicar as diferentes tipologias dos solos.

O gráfico de Braga (2016) da Figura 21 indica faixas de valores de resistividade de diferentes tipos litológicos muito comuns na natureza. Contudo, Bortolin (2009) assume que

essas condições de resistividade apenas ocorrem em meio natural e sem a influência de substâncias diferenciadas que podem alterar a caracterização química e física das rochas e consequentemente afetam os valores de resistividade aparente destas, a exemplo da presença de derivados de petróleo, pesticidas, óleos minerais e/ou vegetais e chorume.

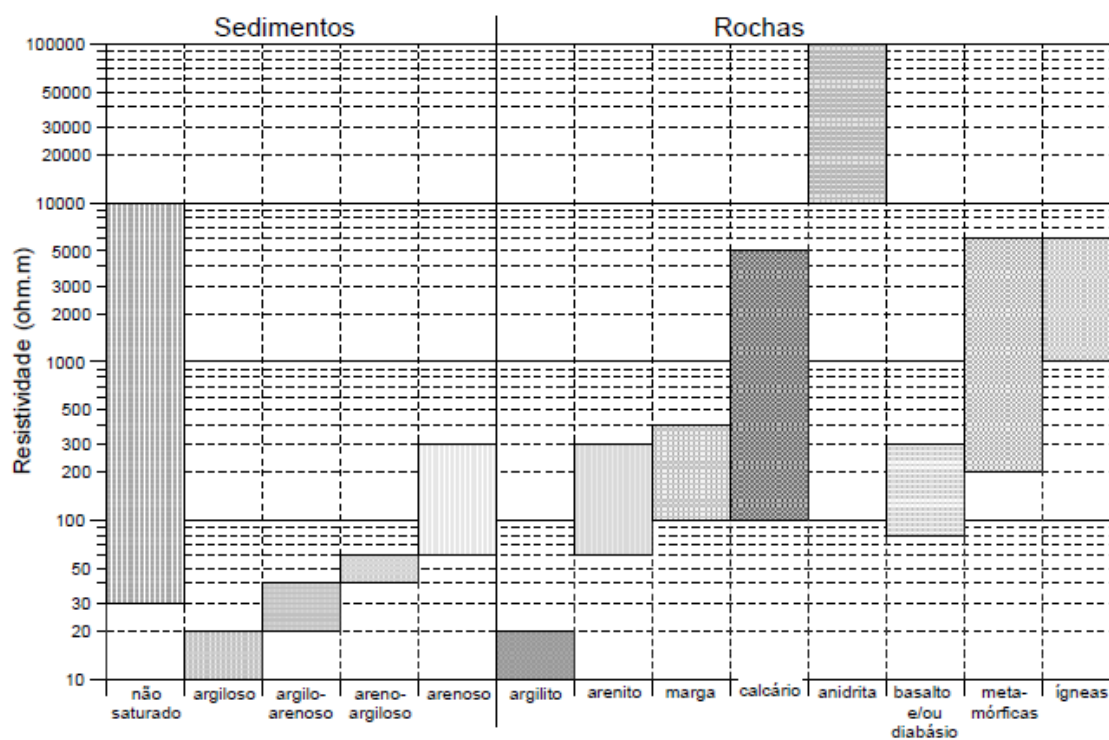


Figura 21. Gráfico das faixas dos valores de resistividade de algumas litologias consideradas principais (BRAGA, 2016).

5.5 Resistividades das Unidades Litológicas do Aterro Sanitário de São Carlos

De acordo com o contexto geológico local do Aterro Sanitário em questão, possivelmente as zonas com valores elevados corresponderiam aos diabásios da Formação Serra Geral, uma vez que as rochas cristalinas não fraturadas apresentam valores de resistividade muito altos (BORGES, 2002). Como mostrado no gráfico da Figura 21, os diabásios apresentam valores de resistividade de 80 a 300 $\Omega.m$ quando se mostram fraturados, alterados e/ou saturados, o que confere com as condições apresentadas pelas seções. Em condições insaturadas e sem alteração, os diabásios podem manifestar resistividades excessivamente elevadas, com valores que podem alcançar até 10.000 $\Omega.m$.

Por sua vez, rochas sedimentares porosas e/ou muito alteradas com alto conteúdo de água e locais com formação de solos pelo intenso intemperismo das rochas cristalinas manifestam reduções expressivas nas medidas das resistividades aparentes (BORGES, 2002; BORTOLIN, 2009; BRAGA 2016). De acordo com os dados do gráfico da Figura 21, os sedimentos inconsolidados de solos coluvionares (constituído por sedimentos arenosos, siltsos e argilosos) dispostos em uma zona saturada seriam atribuídos com valores de resistividade menores ou iguais a 20 $\Omega.m$ para sedimentos argilosos e 60 a 300 $\Omega.m$ para arenitos, nos quais os sedimentos areno-argilosos e argilo-arenosos possuem resistividades definidas entre essa faixa de valores. Neste caso, a variação das resistividades obtidas seria dependente do grau de consolidação da rocha, do seu grau de porosidade, de sua capacidade de condução da água, entre outros fatores (BORTOLIN,2016; BRAGA,2016).

Adicionalmente, as zonas com resistividades aparentes menores que 20 $\Omega.m$ poderiam corresponder à faixa de transição dos diabásios alterados para a formação dos solos residuais, nos quais as argilas formadas pelo intemperismo da rocha básico possui baixos valores de resistividade, ou provavelmente corresponde aos sedimentos contaminados pelo chorume, cuja manifestação ocorre por meio do decréscimo dos valores de resistividade aparente.

O Perfil Esquemático da Figura 22 ilustra de maneira resumida os intervalos de resistividades nas unidades litológicas e pedológicas presentes no Aterro Sanitário de São Carlos. De maneira geral, os diabásios da rocha são dispostos em zonas insaturadas apresentam resistividades maiores que 300 $\Omega.m$. No caso dos diabásios fraturados e/ou alterados localizados em zonas saturadas, serão apresentados intervalos de resistividades de aproximadamente 300 a 100 $\Omega.m$. Por sua vez, as zonas com resistividades menores que 100 $\Omega.m$ são correspondentes ao solo de alteração (residual) oriundo do intemperismo do diabásio e aos sedimentos inconsolidados dos solos coluvionares, ao passo que locais com resistividades menores ou iguais à 20 $\Omega.m$ podem ser correlacionados a solos argilosos alterados ou à possíveis locais de percolação do chorume em subsuperfície.

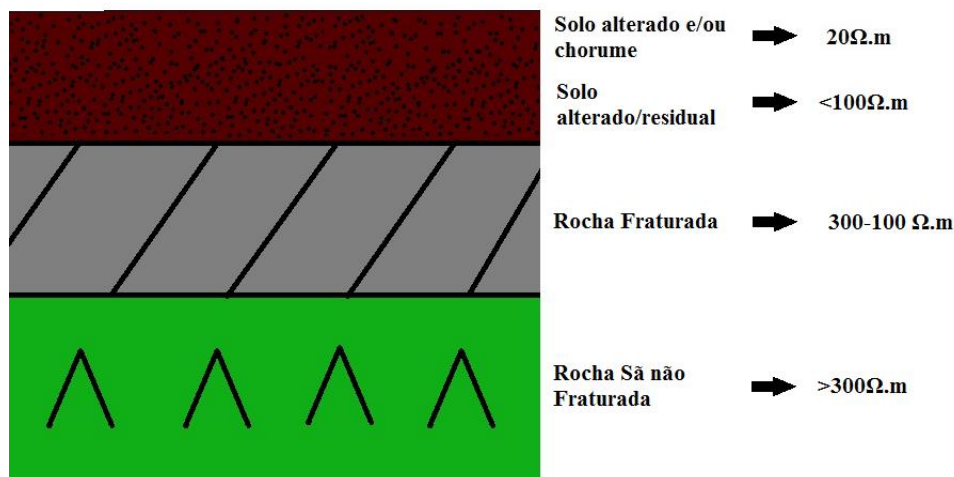


Figura 22. Perfil Esquemático das resistividades do Diabásio da Rocha Sã, da rocha fraturada e do solo alterado com potencial contaminação por chorume.

6. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A discussão e análise das pseudo-seções e modelos geoeletricos de cada linha de investigação efetuada são apresentados nos tópicos seguintes, em conjunto com a análise do Mapa de Contorno e do Mapa de Profundidade da Cota de Topo da Rocha Sã do Aterro Sanitário e dos dados obtidos pelos furos de sondagem a trado.

6.1 Mapa de contorno da cota do topo da rocha sã, Mapa de Profundidade do Topo da Rocha Sã e Furos de Sondagem à Trado.

Os furos de sondagem a trado feitos no Antigo Aterro Sanitário de São Carlos apresentaram variação de profundidade média de 5,5 metros com desvio padrão de 3,47m e cotas médias de 841,6m com desvio padrão de 11,9m da cota do topo da rocha sã de diabásios da Formação Serra Geral. A coluna da Figura 23 mostra a caracterização estratigráfica do Furo de Sondagem ST-05, considerado o mais superficial dos furos de sondagem efetuados e que apresenta profundidades de cota de topo do diabásio de cerca de 1,23 metros. Por sua vez, a coluna da Figura 24 é correspondente ao furo de sondagem ST-11, o qual possui as maiores profundidades de cota de topo da rocha sã de aproximadamente 13,48 metros.

COTA 835.13	AVANÇO	NA E DATA	PERFIL DO SUBSOLO	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
835	TH	N A O	1.11 1.29	Argila muito siltosa, pouco arenosa, vermelha escura – COLÚVIO.
		A T I N G I D O		Silte arenoso, com eventuais fragmentos de rocha, variegado – SOLO RESIDUAL DE BASALTO (FORMAÇÃO SERRA GERAL).
				ROCHA OU MATAÇÃO – IMPENETRÁVEL AO TRADO.

Figura 23. Coluna do furo de sondagem à trado ST-05 com profundidades mais rasas do topo da rocha sã (diabásio).

COTA 864.48	AVANÇO	NA E DATA	PERFIL DO SUBSOLO	CLASSIFICAÇÃO DO SOLO
860	TH	N A O	3.76 4.12	Argila muito siltosa, pouco arenosa, vermelha escura – COLÚVIO.
855		A T I N G I D O		Argila muito siltosa, pouco arenosa, com pedregulhos (fragmentos de rocha) vermelha escura – COLÚVIO.
850			13.60	Silte arenoso, variegado (verde) – SOLO RESIDUAL DE BASALTO (FORMAÇÃO SERRA GERAL).
				FIM DO FURO (PROFUNDIDADE DETERMINADA POR GEOINVEST).

Figura 24. Coluna do furo de sondagem à trado ST-11 com profundidades maiores do topo da rocha sã (diabásio).

O Mapa da Cota do Topo da Rocha Sã da Figura 25 expõe a variação das cotas de topo do diabásio são ao longo do Aterro Sanitário, obtido através dos dados fornecidos pelos furos de sondagem atrado. Além de indicar as linhas de investigação da Técnica do Caminhamento elétrico e a localização dos ensaios SEV e dos furos de sondagem, este mapa demonstra o mergulho do topo do diabásio caindo para o Norte, onde se concentram valores de elevação menores da cota de topo da rocha são (marcados por cores azuladas) em relação aos locais com maiores elevações (cores amareladas a acastanhadas) do topo do diabásio situados na porção S-SW do mapa.

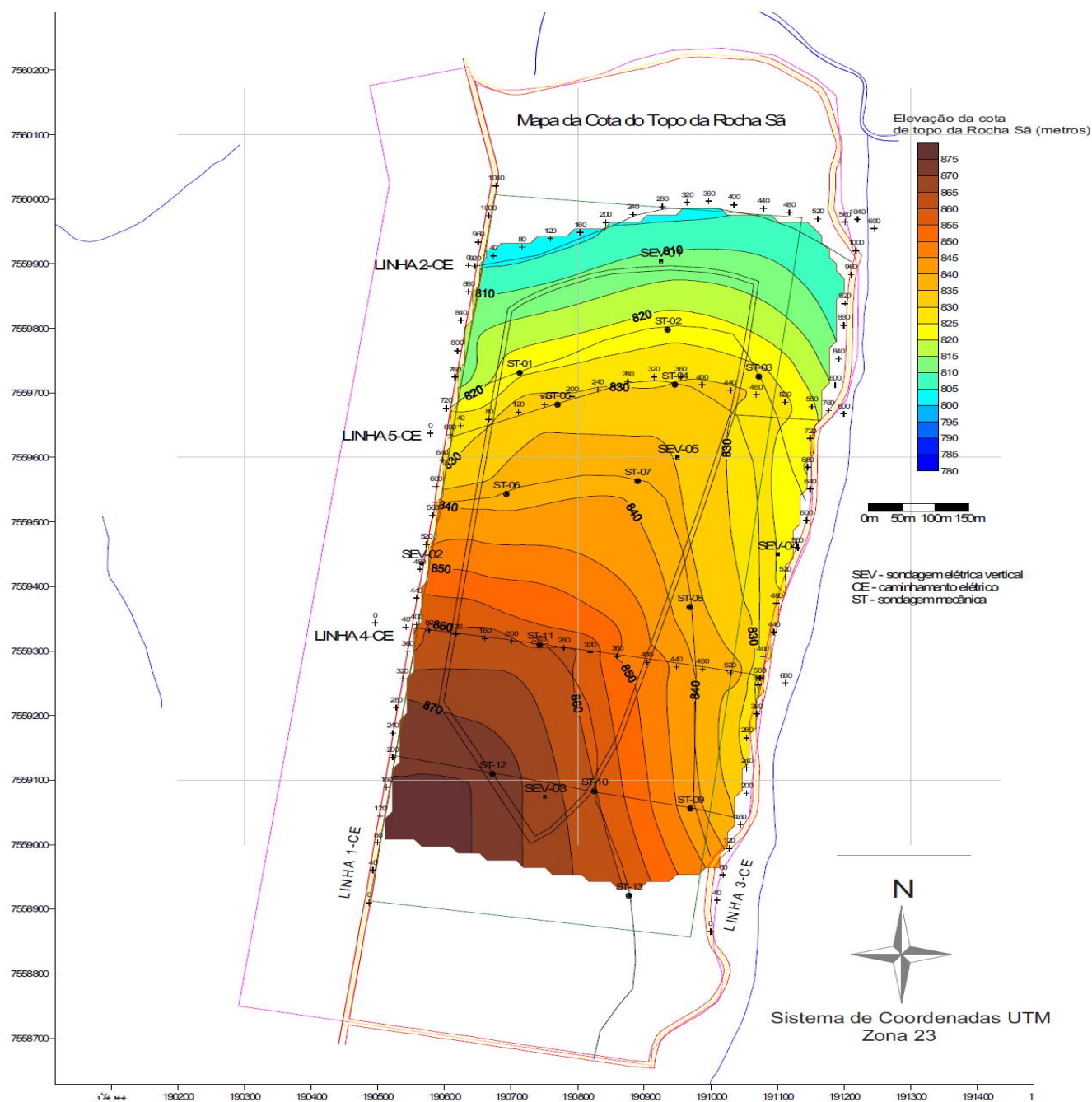


Figura 25. Mapa de contorno da cota do topo da rocha sã (diabásio) do antigo Aterro Sanitário de São Carlos da Fazenda Guaporé.

Por sua vez, o Mapa de Profundidade de Topo da Rocha Sã da Figura 26 expõe as variações pontuais de profundidade do topo do diabásio são em relação à diferença das cotas topográficas do Aterro Sanitário com as cotas do topo da rocha são. O mapa mostra que o topo da rocha são se encontra em níveis mais rasos na maior parte da área do Aterro, com profundidades aproximadas de 1 a 8 metros marcados pelas cores azuladas. Entretanto, as zonas marcadas pelas cores verde-oliva e amarelas indicam profundidades maiores de cerca de 8 a 14 metros, situados nos limites SE e NW do aterro e no furo de Sondagem ST-11.

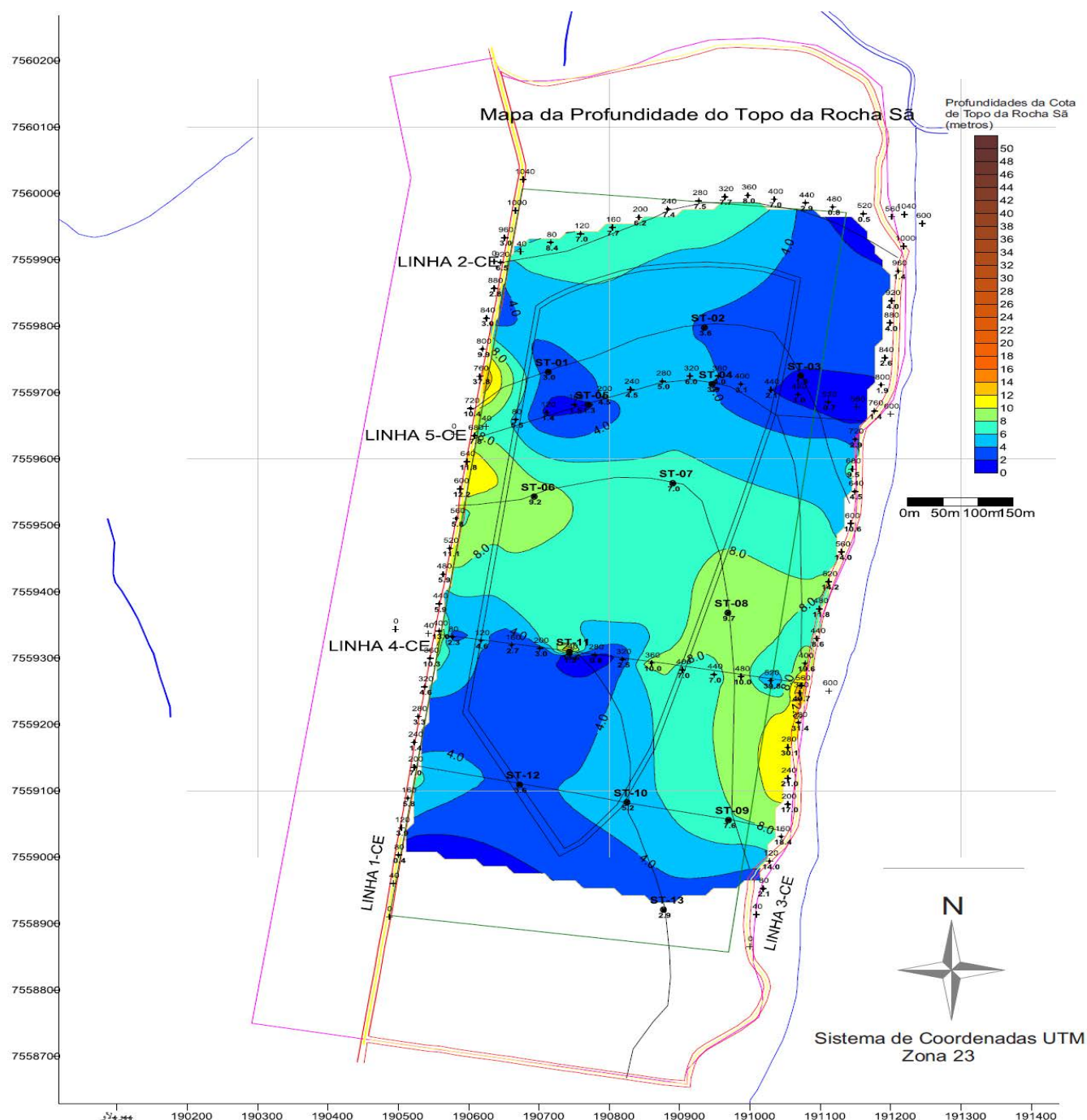


Figura 26. Mapa da Profundidade de Topo da Rocha Sã (diabásio) do antigo Aterro Sanitário de São Carlos da Fazenda Guaporé.

6.2 Pseudo-Seções e Modelos Geoelétricos das Linhas de investigação.

Os resultados obtidos pelas pseudo-seções e modelos geoelétricos das Figuras 27 a 31 indicaram principalmente as variações laterais e de profundidade dos valores de resistividade de acordo com os tipos litológicos locais e o grau de alteração do diabásio são em solo residual.

As Pseudo-Seções das cinco linhas de investigação (Figuras 27 a 31) expõem zonas de cores amareladas à acastanhadas com altos valores de resistividade aparente maiores que $2000\Omega.m$ e zonas de valores muito baixos menores que $2000\Omega.m$ manifestados através de cores azuladas. As zonas com valores maiores que $2000\Omega.m$ provavelmente são equivalentes aos diabásios da rocha sã em condições insaturadas. Por outro lado, as zonas de resistividades menores que $2000\Omega.m$ podem ser correspondentes aos sedimentos inconsolidados coluvionares, ao solo residual oriundo da alteração intempérica dos diabásios da rocha sã, aos diabásios fraturados e alterados e aos meios de percolação da pluma de contaminação de chorume dispostos em uma zona não saturada, com transição para uma zona saturada a partir de locais com valores de resistividade menores que $300\Omega.m$.

Todavia, os valores de resistividade aparente das pseudo-seções não expressam os limites das profundidades de cada intervalo dos valores de resistividade aparente de forma eficiente, pois não apresentam os valores reais da seção geológica. Desta forma, os limites das profundidades de cada faixa de medidas reais das resistividades são manifestados por meio dos modelos geoelétricos após o processamento dos dados.

No caso dos modelos geoelétricos das cinco linhas de investigação (Figuras 27 a 31), as zonas de resistividades maiores que $500\Omega.m$ marcadas por cores avermelhadas, alaranjadas e arroxeadas provavelmente são correspondentes aos diabásios da Formação Serra Geral que compõem a rocha sã, ao passo em que as zonas de tonalidades claras com cores esverdeadas e azuladas caracterizadas por valores de resistividade menores que $500\Omega.m$ seriam equivalentes aos sedimentos inconsolidados e ao solo alterado provavelmente contaminados pela percolação da pluma de contaminação de chorume. A análise dos resultados dos modelos geoelétricos fornecidos por cada Linha de Investigação com correlação com as informações exibidas pelos

Mapas de Contorno e Profundidade de Cota de Topo da Rocha Sã são descritas nos tópicos seguintes.

6.1.1. Linhas Geofísicas

O modelo geoeletrico da Linha 1 (Figura 27) expõe três anomalias de resistividade em elevações entre 880 a 850m, situados nos intervalos entre as estacas 120 a 160, 280 a 320 e 720 a 800. As duas anomalias dispostas entre as estacas 120 a 160 e 280 a 320 possuem uma configuração verticalizada e um variação lateral abrupta entre as medidas de resistividades baixas a altas, assim como também mostrado pela anomalia das estacas 720 a 800.

Em relação aos Mapas de Contorno da Cota de topo e o Mapa de Profundidade da Rocha Sã (Figuras 25 e 26), este modelo indica uma ampla variação dos valores de resistividade ao longo do Aterro Sanitário ao expor um perfil paralelo a desnível da cota do topo da rocha sã no sentido S-N. O modelo indica um desnível do topo do diabásio de aproximadamente 880 a 800 metros, o que equivale de maneira eficiente o mergulho da rocha sã apresentado pelo mapa da Figura 25. O modelo também expõe dois locais com profundidades do topo do diabásio aproximadas de 10 a 14 metros localizados nas estacas 600 a 640 e 720 a 800, o que confere com a localização da anomalia de baixa resistividade.

Possivelmente esses aspectos seriam correspondentes a fraturamentos e/ou falhamentos associados à percolação do chorume nas rochas básicas presentes, nos quais há uma redução abrupta das resistividades nestas fraturas ao serem preenchidas por água contendo contaminantes.

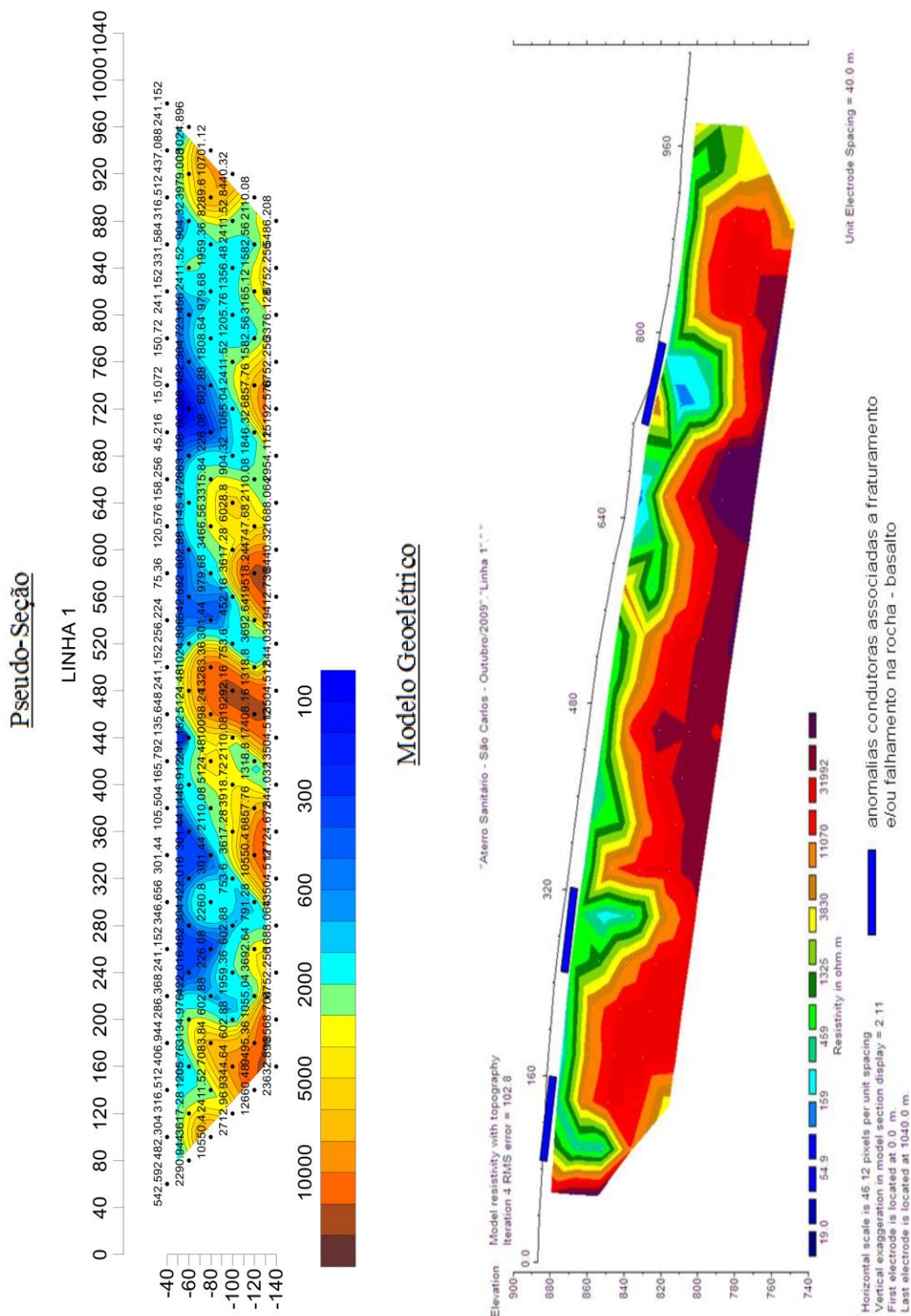


Figura 27. Pseudo-seção e Modelo Geoeletrico resultante da investigação do Caminhamento Elétrico (CE) - Linha 1.

O oposto do modelo indicado pela seção da Linha 1 pode ser observado no Modelo Geométrico da Linha 2 (Figura 28), no qual não são exibidas grandes variações de resistividade ao longo da seção como resultado do perfil de corte transversal em relação ao diabásio da rocha sã. A correlação com o Mapa de Contorno da Figura 25 manifesta o maior caimento da cota de topo do diabásio, com valores de elevação de cerca de 800 a 805 metros. Em relação ao Mapa de Profundidade da Figura 26, o modelo expõe níveis muito rasos do topo da rocha básica em intervalos de aproximadamente 0 a 8 metros de profundidade com pouca variação ao longo do perfil. O modelo expõe meramente uma anomalia discreta entre as estacas 400 a 440, provavelmente associada à proximidade com a intersecção com a Linha de Investigação 3 ou com algum possível fraturamento com percolação de chorume ou com o acúmulo de sedimentos e solos residuais contaminados.

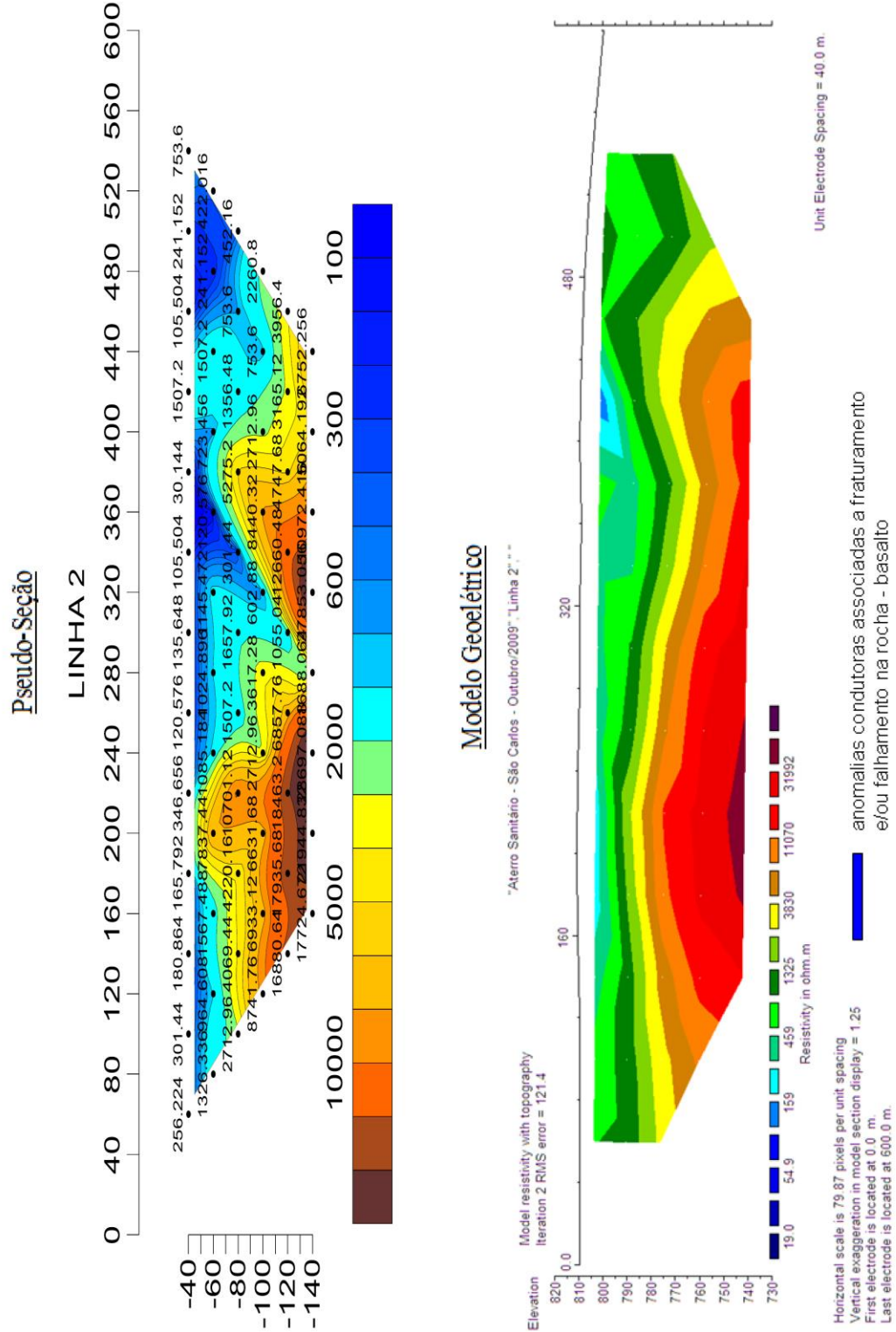


Figura 28. Pseudo-seção e Modelo Geoeletrico resultante da investigação do Caminhamento Elétrico (CE) - Linha 2.

No modelo geoeletrico da linha de investigação 3 (Figura 29), a seção indica duas anomalias localizadas em elevações entre 830 a 800m nos espaços entre as estacas 320 a 400 e 640 a 720, que também manifestam mudanças laterais abruptas das medidas de resistividade que possam indicar fraturamentos no diabásio associados à percolação do chorume. Assim como o Modelo Geoeletrico da Linha de Investigação 1 (Figura 27), o modelo da Linha 3 também expressa destacada variação das resistividades ao longo de um corte paralelo ao mergulho da rocha sã ao longo do Aterro Sanitário com atitude S-N em relação aos mapas das Figuras 25 e 26. O modelo geoeletrico da Linha 3 mostra um desnível do topo da rocha de aproximada 830 a 790 metros bastante similar ao apresentado pelo Mapa de Contorno da Cota de Topo da Rocha Sã da Figura 25. Em comparação com o Mapa de Profundidade do Topo da Rocha Sã da Figura 26, a seção geoeletrica apresenta maiores profundidades de cerca de 10 a 12 metros nos espaço entre as estacas 200 e 400 onde se situa uma das anomalias, o que possivelmente sugere a localização de uma fratura ou acúmulo de sedimentos contaminados por chorume.

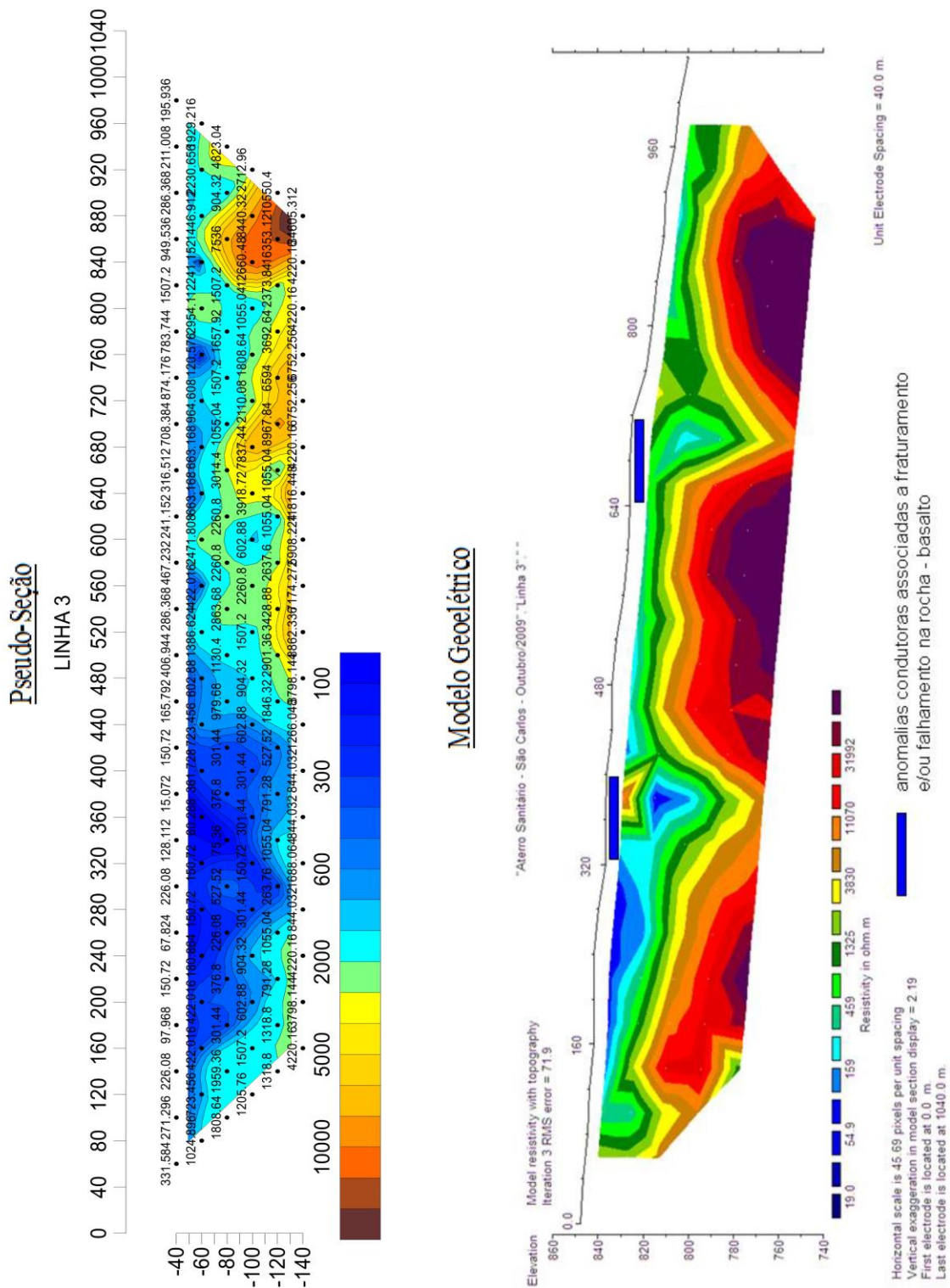


Figura 29 Pseudo-seção e Modelo Geolétrico resultante da investigação do Caminhamento Elétrico (CE) - Linha 3.

O modelo geoeletrico da linha de investigação 4 da Figura 30 manifesta uma anomalia de resistividade relativamente superficial com valores de elevação entre 860 a 840m situada no intervalo entre as estacas 440 a 480. Assim como a seção geoeletrica da linha de investigação 2, o modelo da linha 4 apresenta-se em um perfil transversal nos mapas das Figuras 25 e 26 e consequentemente manifesta poucas variações de resistividade como nos modelos das Linhas 1 e 3. Observa-se, porém, que a anomalia das estacas 440 a 480 situa-se na intersecção com a Linha de Investigação 3 nas estacas 440 a 480, além de também haver valores de resistividade reduzidos na intersecção com a Linha de Investigação 1 nas estacas 360 a 440. Estes dois locais também apresentam profundidades maiores de aproximadamente 8 a 12 metros em comparação com o Mapa de Profundidade da Figura 26, o que pode remeter a ocorrência de fraturamentos ou maiores espessuras de sedimentos com concentração de chorume nestas duas intersecções entre as linhas 1,3 e 4.

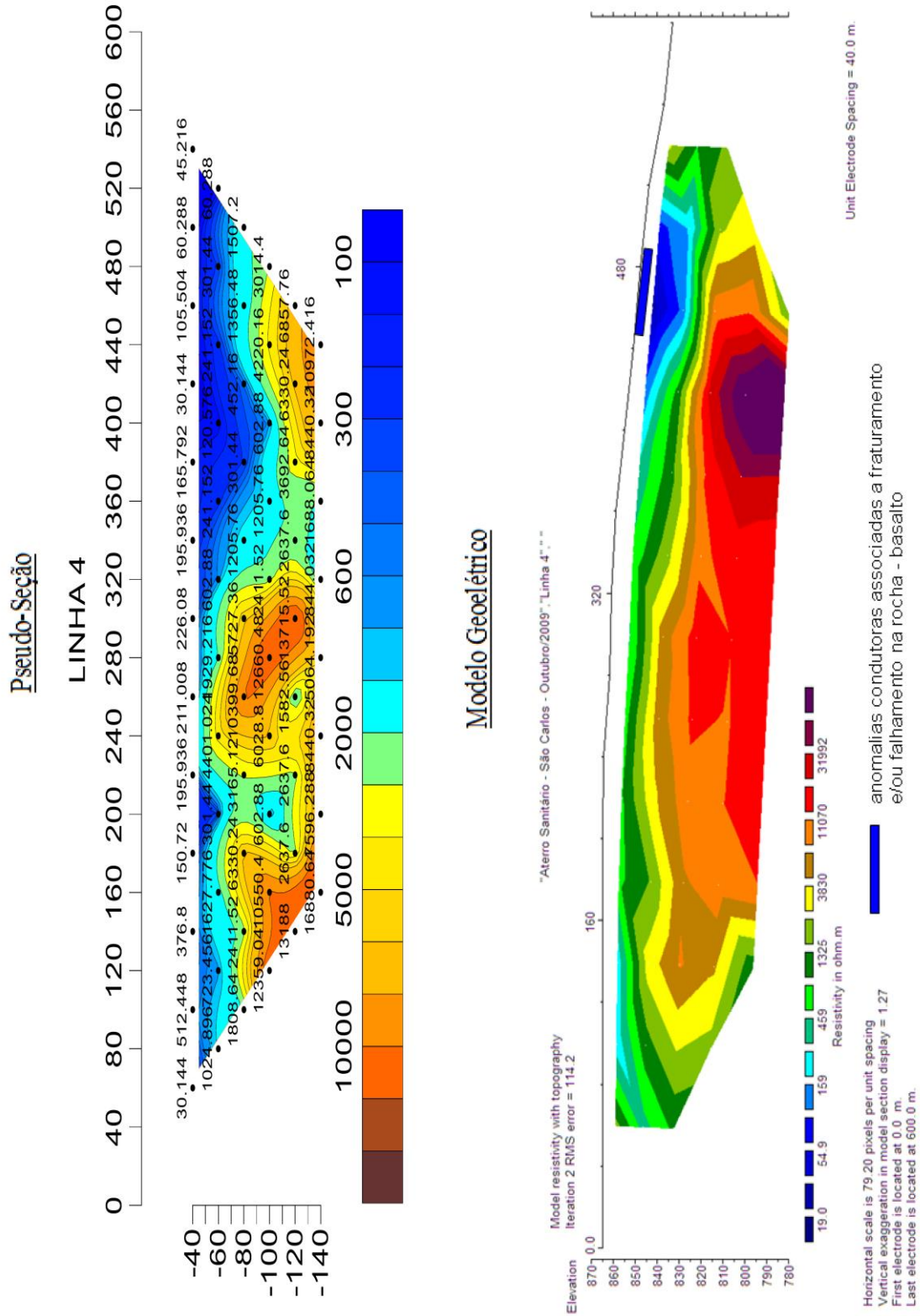


Figura 30. Pseudo-seção e Modelo Geolétrico resultante da investigação do Caminhamento Elétrico (CE) - Linha 4.

Assim como os modelos apresentados pelas Linhas 2 e 4, o Modelo Geoelétrico da Linha de Investigação 5 (Figura 31) também foi efetuado em um corte transversal na área do aterro sanitário, e portanto não manifesta relevantes modificações dos valores de resistividade ao longo da seção. Da mesma forma, os locais com menores valores de resistividade situam-se nos extremos da seção geoelétrica nos intervalos das estacas 0 a 160 e 480 a 560, localizados nas intersecções com as Linhas de investigação 1 e 3 (estacas 640 a 720 e 720 a 800, respectivamente). Observa-se que nestas intersecções entre as linhas 1, 3 e 5 ocorrem anomalias discretas de resistividade em suas seções geoelétricas (Figuras 27,29 e 31), além da ocorrência de maiores profundidades de aproximadamente 8 a 10 metros na intersecção com a Linha 1 em comparação com o Mapa de Profundidade da Figura 26. Por outro lado, a seção geoelétrica da Linha 5 apresenta baixas elevações e profundidades da cota do topo do diabásio, no qual provavelmente existe uma zona de fraturamento com percolação de chorume na intersecção com a Linha 1.

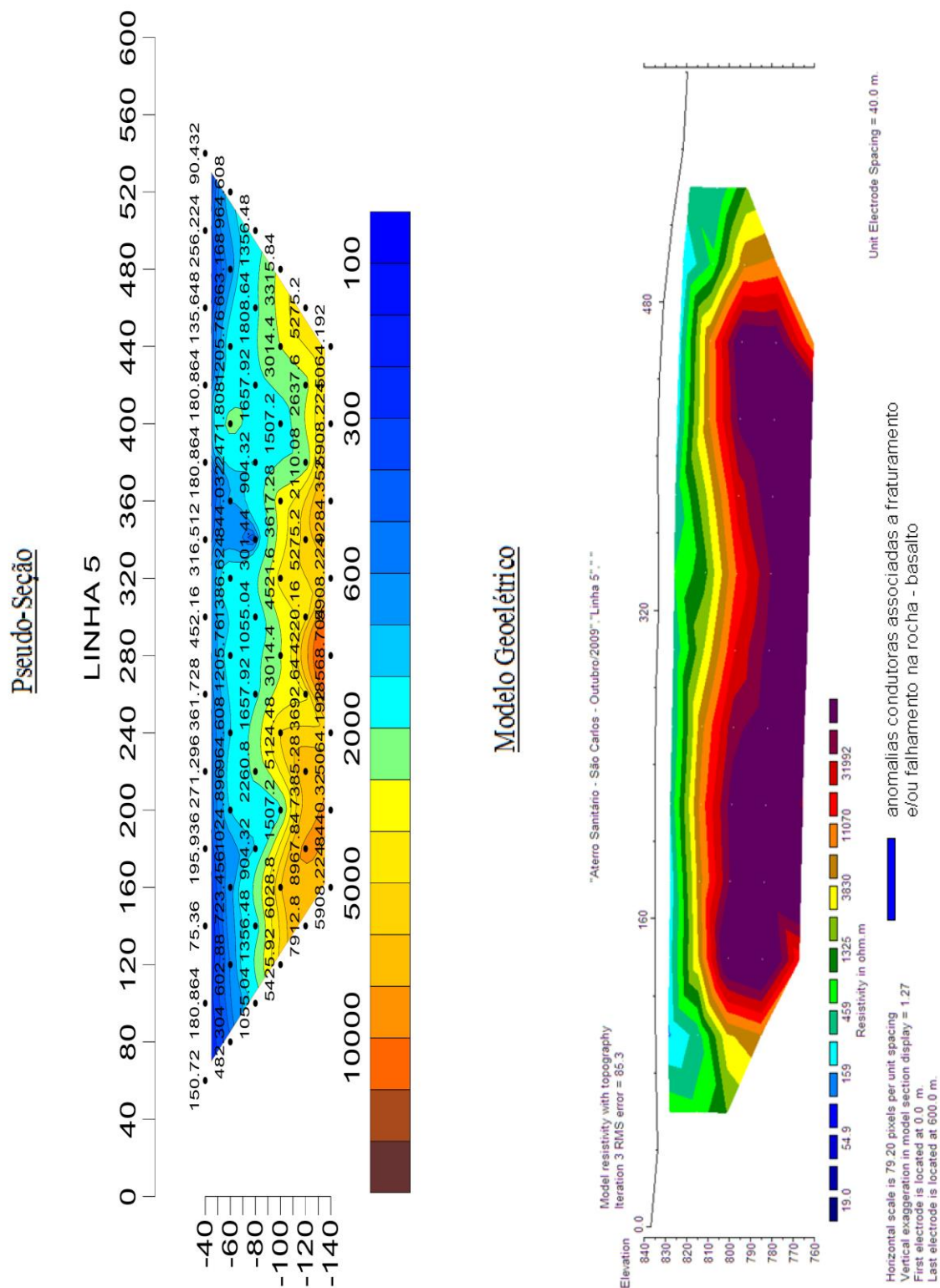


Figura 31. Pseudo-seção e Modelo Geométrico resultante da investigação do Caminhamento Elétrico (CE) - Linha 5.

6.3 Integração dos Resultados Obtidos.

A análise integrada dos furos de sondagem a trado (Figuras 23 e 24) com os Mapas de Contorno e Profundidade da cota de topo da rocha sã (Figuras 25 e 26) expôs que, apesar de a cota de topo do diabásio da rocha sã manifestar mergulhos com caimento para Norte, as profundidades apresentadas são em sua maioria rasas na maior parte do terreno do aterro sanitário. Nesta área, observa-se por meio da análise de alguns furos de sondagem que nestes locais predominam horizontes de sedimentos inconsolidados e solos residuais (compostos por argilas muito siltosas coluvionares, solos residuais silto-argilosos e silto-arenosos com fragmentos de rochas) pouco espessos, como ilustrado na coluna do furo ST-05 da Figura 23. Entretanto, nos locais onde foram registradas maiores profundidades da cota de topo da rocha sã também foram constatadas espessuras maiores de solos coluvionares e solos residuais, a exemplo da coluna obtida pelo furo ST-11 (Figura 24). Portanto, os mapas e os furos de sondagem indicam que existe uma correlação direta entre a profundidade de cota do topo do diabásio sã com o aumento da espessura locais do solo residual da alteração da rocha máfica da Formação Serra Geral e dos sedimentos inconsolidados coluvionares.

No caso das pseudo-seções e modelos geoeletricos das cinco Linhas de Investigação (Figuras 27 a 31), as seções que apresentaram anomalias expressivas de baixas resistividades foram indicadas através das Linhas de Investigação 1 e 3 das Figuras 27 e 29, cujo corte paralelo ao mergulho do caimento da cota do topo da rocha sã mostrou maiores variações dos valores de resistividade de acordo com os tipos litológicos do que as seções geoeletricas de perfis transversais apresentados pelas Linhas 2, 4 e 5 (Figuras 28, 30 e 31).

As anomalias observadas foram principalmente averiguadas nas intersecções das linhas 1 e 3 com as demais linhas de investigação, as quais também se situavam em locais com maiores profundidades do topo da rocha sã com elevadas espessuras de sedimentos e solos residuais ao serem correlacionadas com o Mapa de Profundidade do Topo da Rocha Sã (Figura 26) e com os dados dos furos de sondagem.

Contudo, a redução excessiva dos valores de resistividade não ocorre exclusivamente devido ao aumento da espessura local de sedimentos e solos residuais, pois nenhuma anomalia de resistividade foi examinada no modelo geoeletrico da Linha de Investigação 4 (Figura 30) na estaca 240, onde se encontra o furo ST-11 nos mapas das Figuras 25 e 26 e que manifesta as maiores espessuras de sedimentos e solos na área deste aterro sanitário. Observou-se também que as anomalias apresentadas pelas linhas 1 e 3 exibem formatos verticalizados com variação lateral abrupta dos valores de resistividade, o que pode consistir em uma zona de falhas e fraturas do diabásio nas quais pode haver a percolação de água e chorume.

É possível constatar a partir dos dados obtidos que as anomalias de resistividades não são resultantes apenas por meio de fraturamentos e/ou aumentos locais da espessura de sedimentos e de solos alterados. Supõe-se que a hipótese mais provável seria a de que o principal agente causador das anomalias de resistividade observadas é causado pela percolação da pluma de contaminação de chorume por meio das fraturas e falhas do diabásio e pelos pacotes porosos de sedimentos inconsolidados e solos residuais.

Os valores de resistividade reduzidas dos solos inconsolidados e residuais apresentados pelos modelos das linhas transversais 2, 4 e 5 (Figuras 28, 30 e 31) acompanham o gradiente do fluxo da percolação do chorume no mesmo sentido do mergulho do topo do diabásio são mostrado no Mapa da Cota do Topo da Figura 25. Apesar de haver a possibilidade de o solo inconsolidado e algumas anomalias de resistividade poderem ser relacionadas à disposição de solo e resíduos sólidos gerados pela operação do Aterro Sanitário, estes podem ser apenas confirmados por meio da análise físico- química por amostragem.

Desta maneira, pode-se assumir que a variação dos valores de resistividade apresentados pelos ensaios no Antigo Aterro Sanitário de São Carlos é regida principalmente por três fatores:

- Aumento da espessura local dos solos superficiais: O intemperismo progressivo do diabásio são acarreta na geração de maiores espessuras de solo residual. Consequentemente, ocorrerá uma redução dos valores de resistividade nos modelos geoeletricos conforme o progresso do intemperismo (BORTOLIN,2009; BRAGA, 2016).

- Zonas de fraturamento e/ou falhamento da rochas: Rochas muito fraturadas apresentam decréscimo nas medidas de resistividade devido à entrada de água pelas fraturas e como resultado dos eventos tectônicos locais (BORGES,2002; BORTOLIN,2009; BRAGA, 2016)
- Presença de Contaminantes e percolação do chorume: A presença de chorume em subsuperfície gera uma diminuição nos valores de resistividade, uma vez que o chorume é composto por elevada quantidade de íons gerados pela decomposição dos resíduos sólidos e por alto conteúdo de água pluvial que resultam no aumento de condutividade do meio (BORTOLIN, 2009).

7. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Os resultados obtidos através da Técnica do Caminhamento Elétrico indicaram anomalias de resistividades muito reduzidas que provavelmente foram geradas pela percolação de uma pluma de contaminação de chorume produzida pela degradação dos resíduos sólidos do Antigo Aterro Sanitário de São Carlos da Fazenda Guaporé, além de também serem influenciadas conforme a variabilidade da espessura dos sedimentos inconsolidados coluvionares e solos residuais e pela associação com o fraturamento do diabásio da Formação Serra Geral que compõe a rocha sã. Assume-se neste caso que existe a possibilidade de a pluma de chorume estar correlacionada aos fraturamentos da rocha sã e ao aumento da espessura de solo e sedimentos, uma vez que o líquido contaminante pode percolar através das fraturas e falhamentos do diabásio, pelos sedimentos porosos e permeáveis de aspecto arenoso e siltoso e pelo solo.

Por ser um método indireto, o Método da Eletrorresistividade indica locais potenciais de contaminação, podendo estar ou não associados à outros fatores como fraturamento, alteração da rocha, saturação do solo, entre outros. Desta forma, existe um percentual de incerteza quanto a interpretação das anomalias das resistividades, pois estas podem ser o resultado de diferentes fatores. Por outro lado, locais com evidente concentração de resistividades muito reduzidas como as anomalias situadas nas Linhas Transversais 2,4 e 5 com as linhas 1 e 3 paralelas ao

mergulho do diabásio e em locais com grandes profundidades do topo da cota da rocha são com espessuras elevadas de sedimentos inconsolidados e solo alterado e/ou fraturamentos da rocha máfica podem ser bons indicadores da possível percolação da pluma de contaminação.

Desta maneira, sugere-se que se faça primeiramente uma análise físico-química dos contaminantes por meio de amostragem em poços de monitoramento e perfuração por sondagem nos locais indicados pelos modelos geoeletricos apresentados em correlação com os mapas elaborados, com o objetivo de previamente conferir as informações fornecidas pelos métodos geofísicos para obter a confirmação da possível associação dos contaminantes com os fraturamentos e aos sedimentos e solos residuais presentes neste Aterro Sanitário.

8. BIBLIOGRAFIA

ABU-ZEID, N., BIANCHINI, G., SANTARATO, G., & VACCARO, C. (2004). Geochemical characterisation and geophysical mapping of Landfill leachates: the Marozzo canal case study (NE Italy). *Environmental Geology*, 45(4), 439-447.

BORGES, W.R.(2002). *Investigações Geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e eletrorresistividade*. Dissertação de Mestrado, Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BORTOLIN, J.R.M. (2009). *Monitoramento Temporal da Pluma de Contaminação do Aterro Controlado de Rio Claro (SP) por meio do Método da Eletrorresistividade*. Dissertação (Mestrado em Geociências e Meio Ambiente)- Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.

BRAGA, A.C.O. (2016). *Geofísica Aplicada- Métodos Geoeletricos em Hidrogeologia*. 1ª. Edição. São Paulo: Oficina de Textos, 160 p.

BRAGA, A.C.O. (2016). *Webinar: Geofísica aplicada em estudos envolvendo a contaminação de águas subterrâneas*. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=Mtgc4WIE_Mg&feature=youtu.be>. [acesso em 07/07/2016].

BRASIL, Lei Nº12.305 de 02 de agosto de 2010 - *Política Nacional de Resíduos Sólidos*.

CANDIANI, G.; MOREIRA, J.M.L. (2015). *Estudo da Geração de Metano em uma Célula de Aterro Sanitário*. 1ª. Edição. Jundiaí: Paco Editorial.

CETESB (2010). *Manual de Operação de Aterro Sanitário em Valas*. 2ª. Edição. São Paulo: CETESB, 24 p. Disponível em: <http://www.ambiente.sp.gov.br/wp-content/uploads/cea/Aterro_valas.pdf> [acesso em 22/03/2016].

CETESB (2013). *Índice de qualidade de aterros de resíduos – IGR Nova Proposta: Município de São Carlos*. Disponível em: <http://licenciamento.cetesb.sp.gov.br/mapa_ugrhis/iqr/SAO%20CARLOS/2013/S%C3%83O%20CARLOS%20IQR%202013.pdf>. [acesso em 19/08/2016].

COSME DA SILVA, A. (2008). *Estudo da Contaminação do Lençol Freático através da Integração de Técnicas Geofísicas e Geoquímicas em JI-Paraná-RO*. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro.

ELIS, V.R.; ZUQUETTE, L.V. (2002). Caracterização Geofísica de Áreas Utilizadas para Disposição de Resíduos Sólidos Urbanos. *Revista Brasileira de Geociências*, v. 32, n. 1, p. 119-134.

FARIA, C. (2016). *Definição de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/ecologia/definicao-de-residuos-solidos/>>. [acesso em 17/03/16].

FERNANDEZ, R.O. (2014). *Identificação de Oportunidades Exploratórias na Bacia do Paraná Baseada no Estudo dos Sistemas Petrolíferos e na Interpretação de Dados Geofísicos*. Projeto Final (Obtenção de título de Bacharel em Geofísica)- Universidade Federal Fluminense, Niterói.

GALLAS, J.D. et.al.(2001). Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação de área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. *Rev. Bras. Geof.*, São Paulo, v. 19, n. 1, p. 33-46.

GIACOMELI, D.F.; SARDINHA, D.S. (2009?) *Resíduos Sólidos Domiciliares no município de São Carlos/SP, geração, gerenciamento e disposição final*. Disponível em:<<http://www.ambiente-augm.ufscar.br/uploads/A2-087.pdf>>. [acesso em 06/07/2016].

IBGE (2016). *São Carlos: informações completas*. Disponível em:<<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?codmun=354890>>. [acesso em 30/11/2016]

LAGO, A. L. (2004). Aplicação integrada de métodos geofísicos em área de disposição de resíduos sólidos urbanos em Bauru-SP. *Revista Brasileira de Geofísica*, 22(3), 272-272.

LAUREANO, A. T. (2007). *Estudos geofísicos no aterro sanitário de Cuiabá-MT*. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) - Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá.

MARANHAO, Maria da Saudade A. S.; PETRI, Setembrino. (1996). Novas ocorrências de fósseis nas formações Corumbataí e Estrada Nova do Estado de São Paulo e considerações

preliminares sobre seus significados paleontológico e bioestratigráfico. *Rev. Inst. Geol.*, São Paulo, v. 17, n. 1-2.

MARCIELLI SANTOS, F. (2005). *Aplicação de Métodos Geofísicos no Estudo da Contaminação de Águas Subterrâneas no Lixão de Cuiabá-MT*. Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Ciências Exatas e da Terra, Cuiabá.

MILANI, E.J.; GONÇALVES DE MELO, J.H; ALVES DE SOUZA, P.; FERNADES, L.A.; FRANÇA, A.B. (2007). *Bacia do Paraná. Boletim de Geociências da PETROBRÁS*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 265- 287.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (s.d.). *Política Nacional de Resíduos Sólidos*. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/pol%C3%ADtica-de-res%C3%ADduos-s%C3%B3lidos>> [acesso em 17/03/16].

MOREIRA, C. A., & BRAGA, A. C. D. O. (2008). Aplicação do método de polarização induzida em aterro controlado. *Geociências (São Paulo)*, 27(2), 219-227.

MOREIRA, C. A., & DE OLIVEIRA BRAGA, A. C. (2009). Caracterização geoeletrica de contaminantes provenientes da decomposição de resíduos sólidos domiciliares. *Revista Ambiente e Água*, 4(2).

MOREIRA, C. A., BRAGA, A. C. D. O., & FRIES, M. (2009). Degradação de resíduos e alterações na resistividade elétrica, pH e Eh. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27(2), 283-293.

MOREIRA, C. A., BRAGA, A. C. D. O., & HANSEN, M. A. F. (2011). Estimativa do tempo de produção de chorume em aterro controlado por meio de medidas de resistividade elétrica. *Revista Brasileira de Geociências*, 41(3), 549-557.

MOURA, H. P., & MALAGUTTI FILHO, W. (2003). Métodos de Eletorresistividade e de Polarização Induzida Aplicados na Área de Disposição de Resíduos Urbanos: Aterro Controlado de Rio Claro, SP. *Geociências*, 22, 129-139.

REIS, F.A.G.V. (2001). *Formas de Disposição de Resíduos: Aterros Sanitários*. Disponível em: < <http://www.rc.unesp.br/igce/aplicada/ead/residuos/res13.html> >. [acesso em 14/07/2016].

SCHALCH, V. ; LEITE, W. C.de A. ; CASTRO, M. C. A. A. ; MONTAÑO, M. ; PUGLIESI, E. ; MATOS, T. F. L. (2009). Relatório de Impacto Ambiental (RIMA) - Aterro Sanitário para Disposição Final de resíduos sólidos domiciliares do município de São Carlos/SP. Disponível em: < <http://www.saocarlos.sp.gov.br/index.php/meio-ambiente/155943-estudo-de-impacto-ambiental-relatorio-de-impacto-ambiental-do-novo-aterro-sanitario.html> >. [acesso em: 16/03/2016].

SCHNEIDER, R.L.; MÜHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R. A.; DAEMON, R. F.; NOGUEIRA, A. A. (1974). Revisão estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre, 1974. *Anais ... Porto Alegre : SBG* , v. 1

SIMAS, L. (2014?). *Fatores Ambientais que Influenciam na Escolha de Alternativas de Tratamento de Esgotos Urbanos*. Disponível em:<<http://slideplayer.com.br/slide/290397/>>. [acesso em 30/11/2016].

SIQUEIRA, L. F. S. (2011). *Tectônica Deformadora em Sinéclises Intracratônicas: a Origem do Alto Estrutural de Pitanga, Bacia do Paraná, SP*. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.



YAMADA, T., & GONÇALVES, A. R. L. (2007). Ferramentas de geoprocessamento para análise da vulnerabilidade natural das águas sub-superficiais à poluição, área urbana e seu entorno, Município de São Carlos/SP. *Revista Ceciliana*, (28), 113-122.

XAVIER, F. F.; BERKENBROCK, P. E. (2005). Mapeamento geolétrico no aterro sanitário do município de Blumenau, SC. In *Anais do 11º Congresso Brasileiro de Geologia de Engenharia e Ambiental, ABGE, Florianópolis* (pp. 2099-2109).

ZALÁN, P. V.; CONCEIÇÃO, J. C. J.; ASTOLFI, M. A. M.; APPI, V. T.; WOLFF, S.; VIEIRA, I. S.; MARQUES, A. (1985). Estilos Estruturais relacionados a intrusões magmáticas em rochas sedimentares. B. téc. Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 28, n. 4, p. 221 – 230.