



**PROGRAMA DE
PÓS-GRADUAÇÃO
EM GEOCIÊNCIAS
E MEIO AMBIENTE**

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE
SUBSUPERFÍCIE ATRAVÉS DO MÉTODO DA
ELETORRESISTIVIDADE DO CEMITÉRIO
DE MONTE ALTO (SP)**

Fabio Tosi Di Donato

Instituto de Geociências e Ciências Exatas
Câmpus de Rio Claro

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

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE
SUBSUPERFÍCIE ATRAVÉS DO MÉTODO DA
ELETRORESISTIVIDADE DO CEMITÉRIO DE MONTE
ALTO (SP)**

FABIO TOSI DI DONATO

Orientador: Prof. Dr. Walter Malagutti Filho

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Rio Claro (SP)
2019

D677c Donato, Fábio Tosi di
Caracterização geolétrica de subsuperfície através do método da eletrorresistividade do cemitério de Monte Alto (SP) / Fábio Tosi di Donato. -- Rio Claro, 2019
107 p. : il., tabs., fotos, mapas

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: Walter Malagutti Filho

1. Geofísica. 2. Cemitérios. 3. Necrochorume. 4. Eletrorresistividade. 5. Alteração do meio físico. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca do Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro. Dados fornecidos pelo autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

FABIO TOSI DI DONATO

CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE SUBSUPERFÍCIE
ATRAVÉS DO MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE DO
CEMITÉRIO DE MONTE ALTO (SP)

Dissertação de Mestrado apresentada ao Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Geociências e Meio Ambiente.

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Walter Malgagutti Filho

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Dr. Otávio Coaracy Brasil Gandolfo

Resultado: Aprovado

Rio Claro, 29 de março de 2019

AGRADECIMENTOS

Lembrando agora todo o caminho percorrido até aqui, os sentimentos de gratidão e dever cumprido não poderiam ser outros. Começo agradecendo a oportunidade me dada de poder concluir essa dissertação mesmo em meio a uma mudança de emprego e conseqüentemente de moradia neste vasto país. Agradeço assim ao amigo Mateus, o “Smurf”, pela solicitude e disponibilidade nas etapas iniciais deste projeto.

Agradeço aos meus pais por todo apoio e paciência para com seu filho, as amizades novas ou já conhecidas durante as disciplinas, principalmente a parceria das colegas Mari e Naty que faziam mais agradável o trajeto quase diário Piracicaba – Unesp Rio Claro. Ao pessoal da república Mansão, pelo suporte oferecido e momentos de descontração.

Ao professor e orientador Walter Malagutti, por todo apoio a longa distância e conselhos durante esse trajeto, ao professor César Augusto Moreira pela parceria em pontos cruciais do trabalho, e sempre pronto a ajudar nas dúvidas surgidas. Ao Dr. Otávio Gandolfo por compartilhar conhecimento e pelas discussões construtivas no dia da defesa.

A Unesp, e as pessoas que fizeram e fazem parte da sua história e construção como um todo, especialmente a nossa secretária Rosângela, por todas as vezes que foram precisas, nos auxiliar de boa vontade nas questões burocráticas.

Ao amigo Julio César, o “Julião”, companheiro de graduação, e após vários anos novamente companheiro, agora nas disciplinas da Pós. Agradeço a disponibilidade e boa vontade ímpar em trabalho de campo na área de estudo.

Resumo

Os cemitérios atualmente são considerados como potenciais fontes de contaminação, principalmente para as águas subterrâneas. Isso é devido ao líquido produzido durante a decomposição dos cadáveres, denominado necrochorume. Este trabalho investigou uma possível contaminação por necrochorume no subsolo do cemitério da Saudade situado no município de Monte Alto – São Paulo, Brasil. Assim foi aplicado o método da eletrorresistividade, técnica de imageamento elétrico, utilizando três tipos clássicos de arranjos: wernner, schlumberger e dipolo-dipolo. Com o intuito de também comparar os resultados gerados por cada tipo de arranjo. A técnica da sondagem elétrica vertical (SEV) foi utilizada para se indicar a profundidade do nível freático e o fluxo subterrâneo, que foram de 10 m e sentido SW respectivamente. Além da aplicação desses métodos geofísicos, foi realizada uma pesquisa documental nos registros de sepultamentos do cemitério. Obtendo-se um mapa que indica as quadras com maiores números de sepultamentos do cemitério. As seções (2D) resultantes das linhas de imageamento elétrico dos três tipos de arranjo, são muito semelhantes, com algumas poucas diferenças significativas para o arranjo dipolo-dipolo, principalmente em níveis mais profundos. As seções confirmam a presença de áreas de baixa resistividade que contrastam com o restante do meio, indicando possíveis alterações do meio físico causadas pelo necro-chorume. Para visualização em 3D e em mapa, foram confeccionados mapas de vários níveis de profundidade para os resultados de cada arranjo. A sobreposição em mapa dos dados do imageamento elétrico (resistividade), ao mapa de número de sepultamentos por quadra, mostra uma razoável correlação espacial de proximidade entre as anomalias de baixa resistividade, e as quadras de maiores números de sepultamentos. Este trabalho confirma a eficiência do método da eletrorresistividade na investigação ambiental de cemitérios com suspeita de contaminação por necrochorume.

Palavras Chave: 1.Geofísica 2.Cemitérios 3.Necrochorume
4.Eletrorresistividade 5.Alteração do Meio Físico

Abstract

Actually, cemeteries are considered as potential sources of contamination, especially for underground water. This is due to the liquid produced during the decomposition of the corpses, called necrochorume. This work investigated a possible contamination by necro-manure in the subsoil of the Saudade cemetery located in the city of Monte Alto - São Paulo, Brazil. Thus, the method of electro resistivity was applied (electric resistivity tomography), using three classical types of arrays: wernner, schlumberger and dipole-dipole. In order to also compare the results generated by each type of array. The technique of vertical electric sounding (SEV) was used to indicate the depth of the groundwater and the underground flow, which were 10 m and SW direction respectively. In addition to the application of these geophysical methods, a documentary research was carried out in the book records of the cemetery. Obtaining a map that indicates the blocks with greater numbers of burials of the cemetery. The sections (2D) resulting from the electric resistivity tomography, of the three types of arrays, are very similar, with a few significant differences for the dipole-dipole array, especially at deep levels. The sections confirm the presence of areas of low resistivity that contrast with the rest of environment, indicating possible changes in the physical environment caused by the necro-manure. For 3D and map visualization, maps of various levels of depth were made for the results of each array. The map overlay of the of the resistivity data to the map of number of burials per block, shows a reasonable spatial correlation of proximity between low resistivity anomalies and the blocks with the largest numbers of burials. This work confirms the efficiency of the method of electro resistivity in the environmental investigation of cemeteries with suspected of contamination by necrochorume.

Keywords: 1.Geophysics 2.Cemeteries 3.Necrochorume 4.Electrical Resistivity 5.Changes in the Physical Environment

Sumário

1 INTRODUÇÃO	9
2 OBJETIVOS	11
3 REVISÃO DA LITERATURA	12
3.1 Cemitérios e meio ambiente.....	12
3.2 O necrochorume.....	14
3.3 Fatores que contribuem para a decomposição.....	18
3.4 Fenômenos transformativos destrutivos dos cadáveres.....	19
3.5 Fenômenos transformativos conservativos dos cadáveres	20
3.6 Vulnerabilidade do meio físico de subsuperfície à contaminação gerada em cemitérios	21
3.7 Métodos geofísicos na investigação de contaminação em cemitérios	22
4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO.....	26
4.1 Localização e acesso	26
4.2 Aspectos geográficos do município	27
4.3 Histórico da área de estudo	28
4.4 Geologia	30
4.5 Hidrologia e Hidrogeologia.....	34
4.6 Geomorfologia.....	36
4.7 Pedologia.....	38
4.8 Clima	39
5 CONCEITOS SOBRE MÉTODOS GEOFÍSICOS	40
5.1 Geofísica Aplicada	40
5.2 O método da eletrorresistividade	42
5.2.1 Fundamentos teóricos.....	42
5.3 Resistividade aparente.....	47
5.4 Técnica de investigação e arranjos de campo.....	48
5.5 Profundidade de investigação	52
5.6 Pseudo-seções e inversão geofísica	53
6. MATERIAIS E MÉTODOS.....	56
6.1 Dados Geofísicos	56
6.1.1 SEV's e Mapa Potenciométrico.....	58
6.2 Georreferenciamento	59
6.3 Pesquisa Documental de Sepultamentos	60
6.4 Processamento dos dados.....	62
6.5 Ensaio de Permeabilidade de Solo "in situ"	64
7 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO	65
7.1 Ensaio com permeâmetro de Guelph	65

7.2 Mapa de Sepultamentos	67
7.3 Sondagens Elétricas Verticais e Mapa Potenciométrico	68
7.4 Imageamento Elétrico	69
7.5 Comparações entre arranjos das seções e mapas multiníveis	88
7.6 Correlação entre as ZBR's e Locais dos Sepultamentos	91
8 CONCLUSÃO.....	96
Referências Bibliográficas.....	98
ANEXO I.....	105
ANEXO II.....	106

1 INTRODUÇÃO

A demanda pelo aproveitamento de recursos naturais nos centros urbanos aumenta a cada dia em função do crescimento da densidade populacional e da industrialização em muitos países. Essa conjuntura gera uma situação um tanto degradante para o meio ambiente e o aproveitamento sustentável desses recursos se torna cada vez mais uma necessidade.

Atividades extrativistas, industriais, disposição de lixo, assim como serviços relacionados, são atividades potencialmente poluidoras do meio físico, mas ao mesmo tempo constituem parte da infraestrutura de uma sociedade industrial, indispensável ao desenvolvimento.

Após a ocorrência de graves casos de desastres ambientais, como o de Love Canal (EUA), onde moradores de um conjunto habitacional em *Niagara Falls*, estado de Nova York, descobriram que suas casas estavam construídas sobre um canal que havia sido aterrado com dejetos químicos, o que causou intoxicação e contaminação nos moradores (GIBBS, L. Love Canal: the story continues. Gabriola Island:New Society Publisher, 1998). O impacto ambiental decorrente dessas práticas humanas começou a ser objeto de maior estudo, sistematização e regulamentação por parte da comunidade científica e de órgãos político-administrativos, principalmente a partir da década de 1970. As legislações criadas definiram o ar, o solo e as águas superficiais e subterrâneas como bens a se proteger.

Dentre as atividades potencialmente poluidoras existentes, também encontram-se os cemitérios, que só foram reconhecidos como tal há pouco tempo. A falta de conhecimento dos impactos decorrentes dessa prática ocasionou a contaminação do solo e da água subterrânea de vários dessas áreas, já que o procedimento de enterrar corpos foi conduzido sem qualquer tipo de preocupação ambiental ao longo do tempo.

O principal contaminante gerado em cemitérios é um líquido putrefativo, produto da decomposição do corpo humano, também conhecido como necrochorume. Esse líquido libera substâncias orgânicas e inorgânicas que ao entrarem em contato com a subsuperfície podem contaminar o solo e as águas

subterrâneas, se não forem adotados certos procedimentos de controle sanitário nos sepultamentos realizados.

A implantação de cemitérios em áreas sem a devida realização de estudos de avaliação de impacto ambiental, pode aumentar o risco de contaminações. Logo, todos os aspectos que envolvam a implantação desse tipo de empreendimento precisam ser conhecidos, principalmente para preservar a saúde da população.

O crescimento da demanda por estudos e serviços ambientais tornam os métodos geofísicos importantes ferramentas, tanto no diagnóstico quanto no monitoramento de áreas contaminadas.

Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos, em comparação aos métodos tradicionais de investigação direta, é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor, que permite avaliar as condições geológicas locais através do contraste das propriedades físicas dos materiais encontrados em subsuperfície (REYNOLDS, 2011).

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a definição das feições geológicas e hidrogeológicas, identificando as variações naturais destas feições, que podem ser originadas pela presença de uma eventual alteração do meio físico.

Para a finalidade do estudo proposto, foi aplicado o método geofísico da eletrorresistividade, empregando a técnica do imageamento tomográfico, na área do Cemitério da Saudade, localizado no município de Monte Alto (SP), região de afloramento de arenitos da Formação Marília do Grupo Bauru, propícia para ressaltar os contrastes da propriedade física de interesse (resistividade elétrica).

O método detalhado será mostrado no Capítulo 5.2 deste trabalho, assim como todos os aspectos que envolvem os arranjos de eletrodos utilizados, comparando os resultados de cada arranjo, e discutindo acerca de qual arranjo retornou melhores resultados.

2 OBJETIVOS

Esta pesquisa objetivou a caracterização geolétrica de subsuperfície do Cemitério da Saudade, através do método geofísico da eletrorresistividade, empregando a técnica do imageamento tomográfico – Electrical Resistivity Tomography (ERT). Numa tentativa de investigar e mapear possíveis alterações do meio físico geradas pela presença de necrochorume, e correlaciona-las com o histórico de ocupação do cemitério para subsidiar e embasar um diagnóstico ambiental da área.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Cemitérios e meio ambiente

Na civilização ocidental os cemitérios, como conhecemos hoje, tem sido controlados e operados pela Igreja Católica Apostólica Romana, que geralmente sepultavam os mortos nos adros de suas igrejas. Somente no começo do século 19 proprietários privados começaram desenvolver áreas fora da influência religiosa para sepultamentos, tudo porém, sem nenhuma regulação governamental (SPONGBERGER, 2000).

A preocupação ambiental foi ganhando atenção à medida que o número de cemitérios privados foi aumentando, com a adoção de algumas leis ou regulamentações específicas, levando em consideração a condição do solo, drenagem, proximidade com lugares habitados e risco de poluição da água (BERNARD, 1966; SPONGBERGER, 2000).

Na Europa, a Sociedade Francesa de Higiene Hospitalar notificou a relação entre a ocorrência de febre tifoide com a água subterrânea contaminada por necrochorume em um cemitério de Paris, em 1879 (MIGLIORINI, 2002). Há casos históricos também em Berlim, de incidência da mesma doença na população residente nas cercanias de cemitérios, e também de surgimento de água com gosto ruim e odor fétido em fontes próximas a cemitérios em Paris (BOUWER, 1978).

Análises da água subterrânea de um cemitério na Alemanha Ocidental encontraram concentrações de bactérias até 60 vezes mais altas que o *background* da área, alta demanda química de oxigênio, amônia e nitrato nas proximidades de covas (Schraps, 1972).

Foram encontradas altas concentrações de cloreto, bicarbonato, cálcio, sódio e condutividade elétrica em áreas próximas de sepultamentos recentes no cemitério de Botany, Austrália, (Dent, 1995). Dent & Knight (1998) fizeram um estudo em três cemitérios australianos com diferentes tipos de solo, encontrando altas concentrações de fosfato, compostos nitrogenados e bactérias.

Da análise desse quadro, o que se percebe é que os estudos científicos, que tratam sobre essa temática da relação entre cemitérios e meio ambiente, ainda são insuficientes. O desconhecimento dos impactos ambientais que eles podem causar levou a Organização Mundial da Saúde (OMS), agência subordinada à Organização das Nações Unidas (ONU), a publicar, em 1998, um artigo chamando atenção para a falta de pesquisas realizadas e a falta de conhecimento sobre os efetivos impactos que a poluição gerada por cemitérios podem ter no meio ambiente e na saúde humana, reconhecendo tratar-se de uma questão de saúde pública (WHO, 1998).

Estudos dessa natureza foram desenvolvidos principalmente no Brasil, por Bergamo (1954) que foi o primeiro a dar atenção à contaminação das águas superficiais e subterrâneas nos cemitérios e seus entornos, enfatizando a necessidade de estudos geológicos e delimitação de zonas de risco de contaminação ao redor dessas áreas.

Outro pioneiro nesse tipo de estudo foi o Prof. Dr. Alberto Pacheco, do Centro de Pesquisas de Águas Subterrâneas do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo (USP), que a partir da década de 1980 realizou diversos estudos em cemitérios da cidade de São Paulo, constatando contaminação de aquíferos por microrganismos provenientes do necrochorume.

Segundo Pacheco (1986), os cemitérios constituem fontes geradoras de impactos ambientais, onde se destaca o risco de contaminação das águas superficiais e subterrâneas por microrganismos que se proliferam durante o processo de decomposição dos cadáveres, já que a capacidade do solo de reter esses agentes microbiológicos depende de condições físico-químicas que, ausentes, propiciam a contaminação da zona saturada.

Similarmente Migliorini (1994), observou um aumento na concentração de íons, de produtos nitrogenados e metais (Ag, Al, Cr, Fe e Mn) nas águas subterrâneas do cemitério de Vila Formosa, em São Paulo.

Através de um estudo microbiológico, Matos (2001) encontrou em amostras de água do aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, também em São Paulo, bactérias heterotróficas, proteolíticas, clostrídios sulfito-redutores, enterovírus e adenovírus. Nesse trabalho, o autor ainda mostra que

os resultados da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e condutividade elétrica foram maiores nas águas próximas de sepulturas, principais fontes de contaminação da área.

Cabe ressaltar que o risco ambiental nesses locais aumenta com a falta de políticas ambientais e cuidados sanitários, principalmente nos cemitérios públicos (Felicioni *et.al.*, 2007). Seguindo a mesma linha, Matos (2001) afirma que o maior problema está nos cemitérios administrados pelos municípios, nos quais os sepultamentos ocorrem em covas rasas, diretamente no solo, sem qualquer tipo de preocupação ambiental.

Desde suas primeiras pesquisas, Pacheco (1986) já alertava para a necessidade de implantação cuidadosa de cemitérios e fixação de faixas de proteção sanitária para garantir a preservação das águas subterrâneas e o uso potável das mesmas.

A falta de atenção para esse tema chama atenção também pelo fato de o CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) só reconhecer os cemitérios como atividade e/ou empreendimento poluidor com a promulgação da Resolução nº 335, de 03 de abril de 2003, que dispõe sobre o licenciamento ambiental de cemitérios horizontais e verticais e normatiza as exigências necessárias à implantação de medidas de proteção ambiental para evitar a contaminação do solo e das águas subterrâneas.

No Estado de São Paulo existe o Código Sanitário, regulamentado pela Lei Estadual nº 10.083, de 23 de Setembro de 1998, que prevê que as atividades dos cemitérios (inumações, exumações, transladações e cremações) devem seguir os padrões estabelecidos por normas técnicas estaduais.

3.2 O necrochorume

O termo necrochorume, é um neologismo que designa o líquido liberado pelos cadáveres em putrefação. Segundo Miotto (1990), esse neologismo se derivou do termo “chorume”, empregado para designar o resíduo líquido resultante da decomposição da matéria orgânica presente nos lixos domésticos

dispostos em aterros sanitários e lixões, do qual tomou emprestado o seu significado intrínseco.

Depois de morto, o corpo humano sofre diversos processos transformativos e passa a ser um ecossistema de populações formadas por artrópodes, bactérias, microrganismos patogênicos e destruidores de matéria orgânica, que podem pôr em risco o meio ambiente e a saúde pública (MATOS, 2001).

Como os cemitérios são áreas em contínuo processo de sepultamentos de cadáveres, eles apresentam riscos que exigem cuidados técnicos e científicos na sua implantação e operação (MATOS, 2001). A principal fonte poluidora advinda da decomposição dos cadáveres é o necrochorume (Figura 01).

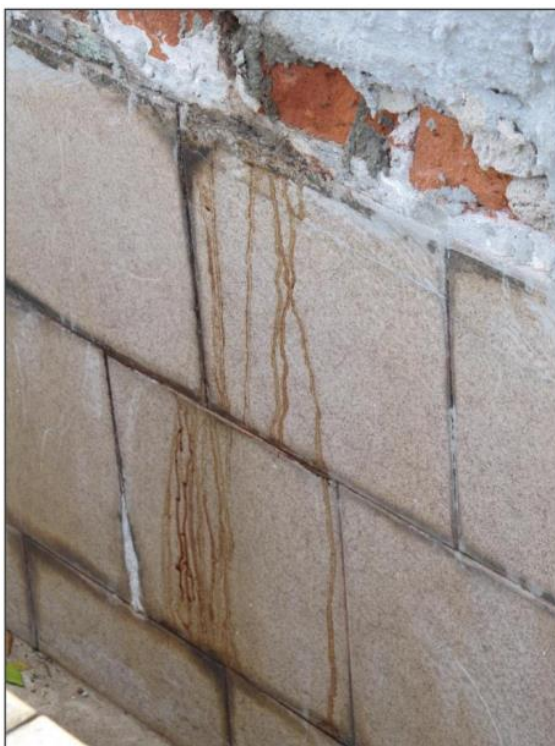


Figura 01: Extravazamento de necrochorume no cemitério municipal de Rio Claro, SP.

Fonte: Xavier (2014).

Após a morte, o corpo humano sofre um processo de putrefação e destruição dos tecidos celulares por ação de bactérias e enzimas, resultando na dissolução gradual em gases, líquidos e sais (ALMEIDA & MACEDO, 2005).

Os gases produzidos nesse processo são o sulfeto de hidrogênio (H_2S), metano (CH_4), amônia (NH_3), dióxido de carbono (CO_2) e hidrogênio (H_2). Alguns desses gases, e uma pequena quantidade de mercaptana (substância que contém sulfeto de hidrogênio ligado a um carbono saturado), são responsáveis pelo odor característico da matéria orgânica em decomposição (POUNDER, 1995).

O necrochorume é mais viscoso que a água (embora bastante solúvel), rico em sais minerais e substâncias orgânicas degradáveis e possui algumas características físico-químicas, como uma coloração castanho-acinzentada, densidade média de $1,23\text{ g/cm}^3$, pH variando entre 5 e 9 dependendo da temperatura (23 a $28^\circ C$), sendo composto de polímeros e com cheiro fétido, com grau variado de patogenicidade, constituído por cerca de 60% de água, 30% de sais minerais, 10% de substâncias orgânicas degradáveis e diversas diaminas, sendo as principais e mais tóxicas a: putrescina (1,4 butanodiamina - $C_4H_{12}N_2$) e a cadaverina (1,5 pentanodiamina - $C_5H_{14}N_2$), que podem ser degradadas, gerando amônio (NH_4^+). A liberação de necrochorume se dá principalmente no primeiro ano de sepultamento (SILVA, 1998).

O estudo de Silva (1995) definiu uma relação entre a massa corpórea e a produção de necrochorume, estabelecendo que para cada quilograma (kg) de massa produz-se 0,6 litros (l) de líquido. Portanto, um indivíduo com 70 kg de massa produziria em torno de 40 litros de necrochorume. A composição do corpo humano (para um homem de 70 kg), conforme mostra a Tabela 01, mostra basicamente uma constituição formada por água, sais minerais e compostos orgânicos, que corrobora a composição do líquido putrefativo calculada por Silva (1998), embora os teores possam variar em cada caso.

A toxicidade elevada do necrochorume é decorrência da presença não só dos compostos orgânicos complexos, mas como também pela presença de agentes patogênicos, como bactérias e vírus.

Substância	Porcentagem de Peso (%)
Água	70 - 74
Carbono	22,86
Nitrogênio	2,57
Cálcio	1,57
Fósforo	0,71
Enxofre	0,2
Potássio	0,2
Sódio	0,14
Cloreto	0,14
Magnésio	0,03
Ferro	0,006

Tabela 01: Composição do corpo humano. Fonte: Dent & Knight (1998).

Como esses organismos, em sua grande maioria, são anaeróbicos, a sobrevivência deles é mais favorecida na zona saturada, onde há pouco O₂ dissolvido na água. Os microrganismos provenientes da decomposição podem, conseqüentemente, ser incorporados ao necrochorume e contaminar o aquífero. O tempo de sobrevivência das bactérias e vírus varia em geral varia de dois a três meses, mas pode atingir cinco anos em condições ideais (ROMERO, 1970).

O trabalho de Pacheco & Matos (2001) revela que bactérias e vírus podem estar presentes no necrochorume e ressaltaram que devido à sua heterogeneidade na composição química, encontra-se números elevados de bactérias degradadoras de matéria orgânica (bactérias heterotróficas), de proteínas (bactérias proteolíticas) e lipídios (bactérias lipolíticas). Entre os diferentes tipos de microrganismos encontram-se também: bactérias que vivem no trato intestinal dos humanos, como a *Escherichia coli*, bactérias do gênero *Enterobacter*, *Klebsiella*, *Citrobacter* (que formam o grupo coliforme total) e a *Streptococcus faecalis*, que provoca diarreias e dores abdominais ao ser ingerida; microrganismos patogênicos como *Clostridium perfringes*, *Clostridium welchii*, que causam tétano, gangrena gasosa e infecção alimentar; *Salmonella typhi*, que causa a febre tifoide, e *Salmonella paratyphi*, que causa a febre paratifoide; *Shigella*, que causa a desintéria bacilar; e o vírus da hepatite A.

Sendo assim, conhecer os fenômenos transformativos que ocorrem na decomposição de cadáveres torna-se necessário para o entendimento dos aspectos ambientais resultantes dessa interação entre necrochorume com o meio físico. O conhecimento dos fatores que influem nesses fenômenos reforça o conceito da atuação do meio ambiente como acelerador ou retardador da decomposição e, conseqüentemente, das características da poluição gerada (MIOTTO, 1990).

3.3 Fatores que contribuem para a decomposição

O processo de decomposição de cadáveres é facilitado pelas condições e características dos solos, assim, deve ocorrer sem oferecer riscos de contaminação ao meio físico. Cabe notar que o desenvolvimento da putrefação está relacionado a fatores intrínsecos do cadáver, como: a idade, constituição do corpo e a causa da morte; e também por características físico-químicas do ambiente de sepultamento, como: temperatura, umidade, aeração e condições do solo.

Com relação à idade, Fávero (1991) registra que os recém-nascidos e as crianças são degradados mais rapidamente que os adultos, assim como indivíduos corpulentos e obesos também têm o processo de putrefação acelerado. A causa da morte tem grande influência no processo transformativo, pois grandes mutilações, estados gangrenosos e vítimas de infecções, apresentam decomposição mais acelerada (FRANÇA, 1985).

A temperatura exerce grande influência no processo de putrefação, pois diante de temperaturas muito altas ou muito baixas, ocorre a aceleração, o retardamento ou até a interrupção da evolução do fenômeno. A temperatura favorável para a ação dos germes putrefativos vai de 20°C a 30°C (FÁVERO, 1991). Segundo França (1985), temperaturas abaixo de 0°C não permitem o início do fenômeno, podendo conservar naturalmente o cadáver.

3.4 Fenômenos transformativos destrutivos dos cadáveres

O corpo humano quando morto, está sujeito à ação de fenômenos transformativos, responsáveis por destruir e reciclar a matéria orgânica morta. Os processos de decomposição são afetados por diversos fatores, como já foi abordado anteriormente. Dentre os fenômenos transformativos destrutivos que podem ocorrer em um corpo, o mais importante é o processo de putrefação. Esse processo é iniciado nos intestinos e regido por fenômenos biológicos e físico-químicos em que atuam microrganismos, que podem ser aeróbios, anaeróbios ou facultativos (NASCIMENTO, 2001). O processo de putrefação engloba quatro fases: a fase de coloração (ou cromática), fase gasosa, fase coliquativa (ou humorosa) e a fase de esqueletização (FÁVERO, 1980). É durante as fases gasosa e coliquativa que ocorre a liberação do necrochorume e acontecem as decorrentes contaminações do meio físico (PACHECO, 1986).

O início da putrefação se dá pelo período da coloração, onde ocorre o surgimento de manchas verdes na fossa ilíaca direita, devido aos gases produzidos pelos microrganismos alojados no início do intestino grosso, que posteriormente se difundem pelo tronco, cabeça e membros (SILVA, 2008). Segundo Silva (1995), a coloração esverdeada escura é um aspecto típico e devido à reação do gás sulfídrico (H_2S) com a hemoglobina, formando a sulfometemoglobina nos tecidos que recobrem o corpo, como a derme e epiderme. França (1985) ressaltam que a ocorrência desse aspecto ocorre entre 18 e 22 horas após a morte e também é influenciado pelo clima. O período da coloração se desenvolve de maneira mais lenta nos cadáveres inumados do que nos conservados ao ar livre, sendo acelerado na presença de água. Silva (1995) salienta que, em geral, este período pode se estender até sete dias após o óbito.

O período gasoso inicia-se com a produção de gases no interior do cadáver, que expandem-se por todo o corpo, gerando bolhas de conteúdo leucocitário hemoglobínico na epiderme. O acúmulo desses gases faz com que o cadáver aumente o seu volume, principalmente na face, no abdômen e nos órgãos genitais masculinos (SILVA, 2008). Silva (1995) afirma que em função da pressão dos gases putrefativos, ocorre a ruptura das paredes abdominais,

liberando os gases e o necrochorume produzido no período coliquativo. O mesmo autor também afirma que uma parte dos gases liberados pelos corpos inumados permanecem retidos no solo, enquanto o restante atinge de maneira quase imperceptível a atmosfera. No caso dos corpos enterrados em túmulos, os gases liberados chegam à atmosfera pelo escape das urnas funerárias e dos túmulos, sendo por vezes perceptíveis ao olfato. Segundo Fávero (1991), esse período tem um prazo mínimo de duração de três semanas.

O período coliquativo é o período da dissolução pútrica do cadáver, devido à desintegração progressiva dos tecidos, no qual as partes moles diminuem de volume, resultando em um efluente líquido intermitente, denominado de produto de coliquação, líquido humoroso ou necrochorume (SILVA, 2008). De acordo com França (1985), neste período o corpo perde sua forma, o esqueleto fica recoberto por uma massa de putrilagem, e surge um grande número de insetos, larvas e germes, que trabalham pela destruição do cadáver. Dependendo das condições do corpo e do terreno, esse período pode estender-se por vários anos.

O período de esqueletização é determinado pela ação continuada dos germes e insetos e da ação do meio ambiente. Os tecidos reduzem-se ainda mais, até que o cadáver apresente os ossos livres, unidos apenas pelos ligamentos (MIOTTO, 1990). Dependendo de algumas condições ambientais os ossos podem resistir por dezenas e centenas de anos, mas com o passar do tempo, esses perdem sua estrutura típica, tornando-se friáveis e mais leves.

3.5 Fenômenos transformativos conservativos dos cadáveres

Os cadáveres podem ainda, sob certas condições ambientais, sofrer fenômenos transformativos conservadores, como a mumificação e saponificação (PACHECO & BATELLO, 2000).

A mumificação é a dessecação ou desidratação dos tecidos. Aparece em condições de clima quente, seco, com correntes de ar. Existem determinados tipos de solos que propiciam a mumificação, como os arenosos das regiões desérticas. Em solos calcários, os corpos inumados ainda podem sofrer uma fossilização incipiente, graças à substituição catiônica de sódio e

potássio pelo cálcio. Assim, têm sido encontradas múmias naturais, muito bem conservadas, sem atarídes, depositadas no solo, em cavernas e catacumbas (PACHECO & MATOS, 2000).

Outro processo conservativo que pode ocorrer em um corpo é o da saponificação, que ocorre pela hidrólise da gordura com liberação de ácidos graxos, os quais, pela acidez, inibem as bactérias putrefativas, atrasando a decomposição do cadáver (MATOS, 2001). Nesses casos forma-se a adipocera, que é uma massa branca, mole, quebradiça, de aspecto céreo, que se forma nos diversos tecidos dos órgãos do cadáver. Segundo Silva (1995), um ambiente quente, úmido e anaeróbio, assim como a presença de bactérias endógenas, favorece a saponificação. O solo argiloso, pouco permeável, alta retenção de água, alta troca catiônica (CTC), quando saturado de água facilita esse tipo de fenômeno (SILVA, 2008).

3.6 Vulnerabilidade do solo e aquífero à contaminação gerada por cemitérios

Segundo Pacheco (2000) é inegável que os cemitérios são um risco potencial para o meio ambiente, em especial ao aquífero livre, sendo que o principal tipo de contaminante desses receptores são microrganismos. Aquíferos confinados, possuem uma vulnerabilidade menor à ocorrência de contaminação nesses casos, embora a construção de poços sem os devidos cuidados técnicos possam mudar esse cenário. A vulnerabilidade de um aquífero também é alta em meios fraturados.

Conforme Silva (1995), os processos de contaminação e de poluição do solo e aquífero ocorrem quando existem condições de vulnerabilidade no meio físico. Essa suscetibilidade é decorrência de uma série de características geológicas, hidrogeológicas, geoambientais e sanitárias, bem como das condições de oferta e atividade dos vetores impostos pela contaminação.

Nos terrenos destinados à implantação de cemitérios, a espessura da zona não saturada é fator determinante para a filtragem dos líquidos resultantes da decomposição de cadáveres (MIOTTO, 1990). A capacidade do solo de atenuar a contaminação gerada nesses casos é função de um conjunto

de fatores, entre os quais se destacam o conteúdo mineral, aeração, teor de umidade, nutrientes, etc. Quando estas condições não são favoráveis, há um aumento na probabilidade do necrochorume atingir e contaminar as águas subterrâneas (PACHECO, 1986; MIOTTO, 1990).

A Resolução CONAMA nº 368/06 dispõe que em cemitérios horizontais o nível mínimo dos sepultamentos deve ocorrer pelo menos um metro e meio acima da maior elevação do nível freático evitar a contaminação da água subterrânea. Quando essas condições não são atendidas, a depender da condutividade hidráulica e das características geológicas do meio, a vulnerabilidade ambiental do aquífero freático aumenta.

Sendo assim, as condições propícias à contaminação das águas são facilitadas em épocas chuvosas, devido à lixiviação dos contaminantes e, principalmente, pela elevação do nível freático. Solos com baixa condutividade hidráulica são bons retentores de contaminantes e fazem com que o nível freático se aproxime das regiões superficiais rapidamente, entrando diretamente em contato com as sepulturas e/ou camadas contaminadas do solo.

3.7 Métodos geoeletricos na investigação de contaminação em cemitérios

O emprego da geofísica aplicada tem crescido muito rapidamente, sobretudo em estudos ambientais, proporcionando suporte para subsídio à resolução de muitos problemas. Sua aplicação em estudos ambientais, envolvendo contaminação de solos, rochas e águas subterrâneas, através de contaminantes orgânicos e inorgânicos, tem sido frequente e despertado a atenção de pesquisadores (Xavier, 2015). O emprego de métodos geofísicos na investigação e mapeamento de possíveis plumas de contaminação vem mostrando grande utilidade no desenvolvimento de pesquisas relacionadas a solo e aquífero.

Dentre os principais métodos geofísicos utilizados para essa finalidade, destacam-se os métodos geoeletricos. Os métodos geoeletricos são de natureza indireta de investigação em subsuperfície, não invasivos e, portanto, não destrutivos. Eles podem ser empregados em diversas áreas de aplicação

da geologia, tais como na pesquisa mineral – identificando possíveis alvos exploratórios; na hidrogeologia – na determinação da profundidade da zona saturada, identificação do sentido do fluxo da água; em meio ambiente - na investigação de contaminantes em subsuperfície, etc.

Essa metodologia permite avaliar variações litológicas ou qualquer anomalia natural ou antrópica, que altere as propriedades físicas dos materiais encontrados em subsuperfície, tais como a resistividade.

A CETESB (2001), principal órgão ambiental do Estado de São Paulo, apresenta como principal objetivo do emprego de métodos geofísicos nos diagnósticos ambientais, a possibilidade de identificação da presença de contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

Através do emprego de métodos geoeletricos, Mendes *et al.* (1989), determinaram os locais mais adequados de pontos de implantação de poços de monitoramento na avaliação de contaminação nos cemitérios de Vila Formosa e de Vila Nova Cachoeirinha, ambos no município de São Paulo. Nesse trabalho, foram utilizados os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético indutivo.

O trabalho de Pacheco *et al.* (1991), em estudos comparativos nos cemitérios de Vila Nova Cachoeirinha, de Vila Formosa e de Areia Branca na cidade de Santos utilizaram o método da eletrorresistividade, para determinação do modelo geoeletrico da área, nível freático, sentido do fluxo subterrâneo, com isso determinando a localização dos poços de monitoramento e piezômetros, e também o método eletromagnético no mapeamento das anomalias condutivas.

Por meio do emprego dos métodos da eletrorresistividade e eletromagnético, Migliorini (1994) investigou anomalias de condutividade características de mudanças localizadas, gerando mapas de isocondutividade elaborados a partir dos dados de caminhamento eletromagnético que evidenciaram áreas anômalas. Essas áreas serviram para orientar a fase de investigação confirmatória com a instalação dos poços de monitoramento nesses locais.

Em investigação na encosta do cemitério Vila Nova Cachoeirinha, Pacheco (1996) relata ter utilizado métodos geoeletricos para instalação de nove poços de monitoramento.

Empregando os métodos da eletrorresistividade e potencial espontâneo Carvalho Jr. e Costa e Silva (1997), determinaram as direções de fluxos d'água no subsolo, bem como topo e base dos aquíferos no cemitério São José, em Belém/PA.

Matos (2001) aplicou os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético para obter informações sobre a litologia, topo da camada saturada, anomalias condutivas, como orientação na instalação de poços monitoramento para investigar a ocorrência e transporte de microrganismos no aquífero freático do cemitério Vila Nova Cachoeirinha.

Através de um estudo multidisciplinar, envolvendo dados geofísicos, geológicos, hidrogeológicos e hidroquímicos, Castro (2008) desenvolveu uma caracterização geoambiental da região do cemitério Bom Jardim, em Fortaleza (CE). Uma das ferramentas utilizadas para o reconhecimento do meio rochoso foi a aplicação dos métodos geofísicos da eletrorresistividade, eletromagnético indutivo e do GPR (*ground penetrating radar*). Após a análise dos dados obtidos, o autor considerou não conclusiva a resposta geofísica, muito em função do mascaramento em função da contaminação do aquífero livre por fossas sépticas na região.

Para a caracterização de eventuais plumas de contaminação por necrochorume, Silva & Malagutti (2010), aplicaram o método da eletrorresistividade no cemitério de Vila Rezende, em Piracicaba (SP), afirmando que a aplicação desse método evidencia grande potencialidade para investigar e mapear eventuais contaminações no lençol freático. Mesma conclusão proposta por Xavier (2014), que faz uso dos métodos geoeletricos da eletrorresistividade e eletromagnético para fazer uma caracterização geoambiental do cemitério municipal de Rio Claro (SP).

Os trabalhos internacionais na investigação da contaminação ambiental por cemitérios com aplicação de métodos geofísicos são mais raros, predominando-se a utilização de métodos diretos de hidrogeoquímica nesses casos. Entretanto, de acordo com Amuno & Amuno (2014), apesar dessa

escassez de literatura sobre solos impactados por cemitérios, alguns autores iniciaram as abordagens nessa temática, como Spongberg & Becks (2000) e Jonker & Olivier (2012), apontando importantes alterações pela putrefação humana na química do solo, com alterações significativas no pH, na condutividade elétrica, e elevações significativas de compostos amoniacais.

Spongberg & Becks (2000) estudaram um cemitério em Ohio, Estados Unidos, e apontaram vários produtos químicos nocivos derivados das práticas funerárias, dentre eles metais como chumbo e zinco, presentes nos caixões feitos de metal.

4 CARACTERÍSTICAS GERAIS DA ÁREA DE ESTUDO

4.1 Localização e acesso

O Cemitério da Saudade está localizado no município de Monte Alto (759.861,64 m E; 7.646.924,67 m S), na região nordeste do Estado de São Paulo (Figura 02).

O acesso terrestre ao município de Monte Alto é facilitado devido ao bom sistema viário disponível na região. As principais vias pelas quais é possível chegar ao município, a partir da capital São Paulo, são as rodovias estaduais Washington Luís (SP-310), Eng. Thyrso Micali (SP-319), Nemesio Cadetti (SP-333), José Della Vechia (SP-323), Brigadeiro Faria Lima (SP-364) e José Pizarro (SP-305).

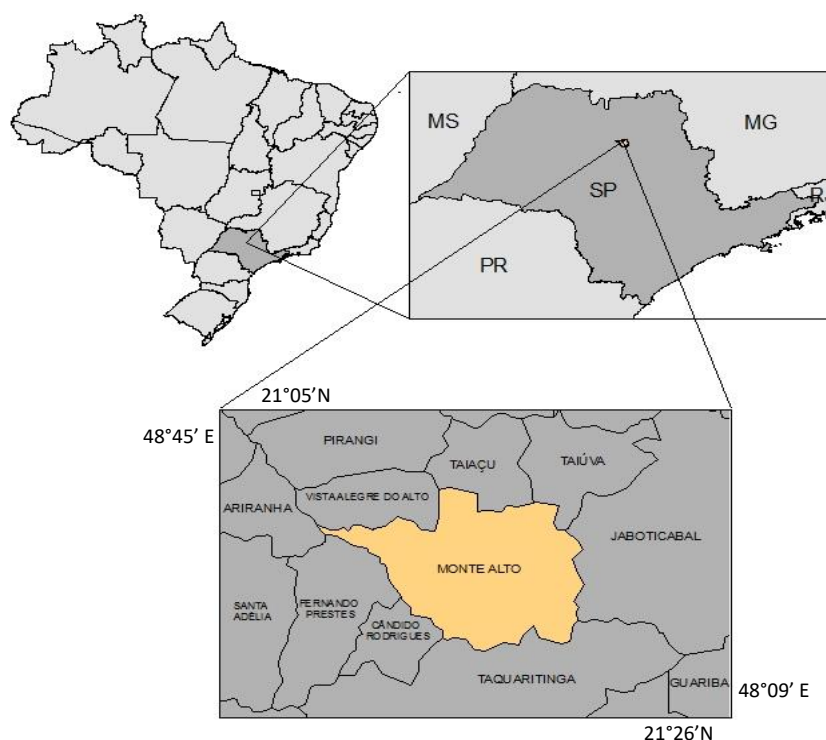


Figura 02: Localização do município de Monte Alto.

O cemitério está instalado na região central da cidade na Rua Jeremias de Paula Eduardo, uma das principais e mais movimentadas vias de Monte Alto. O seu entorno é composto essencialmente por bairros residenciais, como

a Vila São Francisco, o Jardim Santana e Jardim Tangará, além do Centro, principal região da cidade onde estão localizadas as principais atividades comerciais (Figura 03).



Figura 03: Localização do Cemitério da Saudade (área hachurada).

4.2 Aspectos geográficos do município

Monte Alto foi fundada em 15 de Maio de 1881 e possuía uma população de 46.642 habitantes, de acordo com o último censo realizado pelo IBGE em 2010. Com área territorial de 346,950 km², sua densidade demográfica é da ordem de 134,61 hab/km². A altitude média do município é de 735 metros acima do nível do mar e seu clima pode ser definido como tropical de altitude.

O IDHM (Índice de Desenvolvimento Humano Municipal) do município é de 0,768, que de acordo com o Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento (PNUD) significa alto índice de desenvolvimento humano. Sua população urbana é de 44.543 habitantes (95,5% do total), enquanto a população que vive na zona rural é de 2.099 pessoas (4,5% do total), que evidencia avançado processo de urbanização.

4.3 Histórico da área de estudo

Restringindo a observação ao local da realização do estudo, o Cemitério da Saudade, fundado em 22 de fevereiro de 1903, é o único em operação no município (Figura 4). De administração pública, vinculada à Secretaria Municipal de Planejamento, possui uma área de aproximadamente 50.000 m², onde já foram realizados mais de 23 mil sepultamentos em suas dependências, o que representa uma média de 17 sepultamentos/mês ou 204 sepultamentos/ano. Utilizando-se a relação entre massa corpórea e volume gerado de necrochorume, definida por Silva (1995), foram produzidos no cemitério uma média de 8.160 litros de necrochorume por ano (8.160 L /ano).



Figura 04: Entrada principal do Cemitério da Saudade.

O cemitério está dividido em 69 quadras e, historicamente, sua ocupação ocorreu primeiro na sua região central, onde estão localizadas as quadras 01 a 27. Com o passar do tempo, as quadras 28 a 53, mais próximas da entrada principal, foram sendo ocupadas, até que por fim as quadras 55 a 69 foram construídas, nos fundos do terreno.

A medida que o cemitério foi chegando próximo ao esgotamento de sua capacidade, as áreas limítrofes aos seus muros também foram sendo ocupadas para sepultamento. A Prefeitura Municipal também comprou e desapropriou terrenos vizinhos para expandir e dar uma pequena sobrevida ao cemitério, enquanto uma área adequada não é encontrada para implantação de um novo empreendimento (Figura 5).



Figura 05: Área nova do cemitério sendo construída, com covas individuais construídas em alvenaria.

Acerca das práticas funerárias, no Cemitério da Saudade o sepultamento em vala comum, com o caixão disposto diretamente no solo, ocorreu até a década de 1960, período a partir do qual a construção de covas em alvenaria começou ser implantada. Porém, até o ano de 2010, ainda ocorriam sepultamentos em vala comum, nas quadras mais novas e distantes do cemitério (quadras 55 a 69), principalmente de indigentes e população de baixa renda.

As covas de um cemitério são os lugares que podem ser considerados como as potenciais fontes de contaminação desse tipo de empreendimento, já que os caixões, contendo a matéria orgânica que irá se decompor, são dispostos nesses locais e uma eventual percolação de necrochorume no meio físico acontece a partir daí.

No presente, existem três tipos de covas implantadas no Cemitério da Saudade: (1) a carneira, que possui 01 gaveta; o mini jazigo, caracterizado por 03 gavetas; e o jazigo, composto de 04 a 06 gavetas. Todas elas construídas em alvenaria. No interior dessas construções, dependendo do número de

gavetas, podem ser produzidos em média de 40 a 240 litros de necrochorume a cada período de renovação de sepultamentos.

Essas fontes de contaminação podem ser constantemente renovadas já que as sepulturas podem ou não ser perpétuas. As sepulturas que foram ocupadas por pessoas que não possuíam terrenos são reutilizadas, diferentemente de quem está sepultado em terrenos apossados por compra, que são túmulos perpétuos.

Em sepulturas que não são perpétuas, a exumação dos corpos é feita após um período mínimo, de três anos para adultos e dois anos para crianças menores de sete anos. Os ossos dos indivíduos são colocados em sacos pretos e dispostos no canto da mesma gaveta.

4.4 Geologia

A região da área de estudo está inserida no contexto da Bacia Bauru (Figura 06), uma bacia sedimentar intracratônica com extensão de aproximadamente 370.000 km², abrangendo os estados de São Paulo, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso, Mato Grosso do Sul e Paraná, chegando a aflorar até em uma pequena porção do Paraguai (FERNANDES & COIMBRA, 2000).

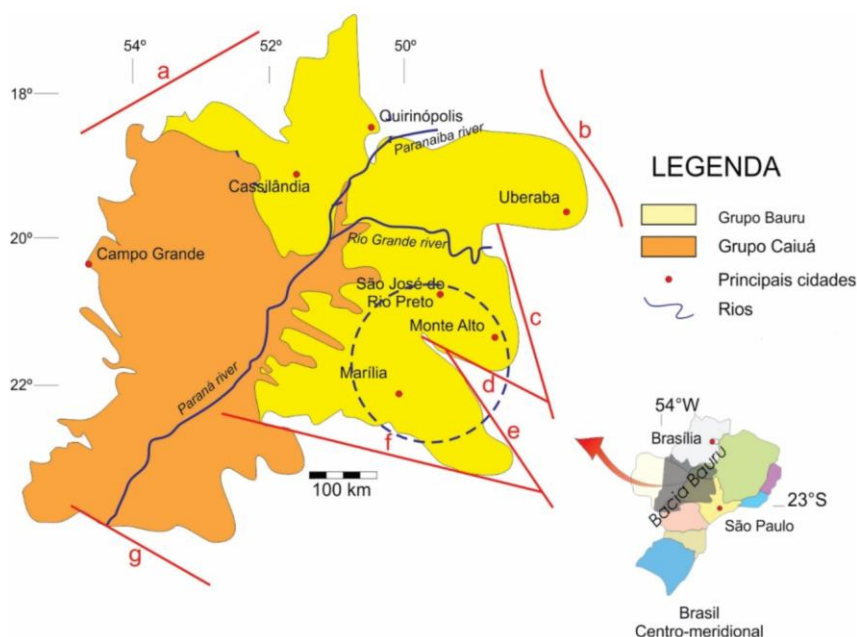


Figura 06: Mapa de localização da Bacia Bauru. Fonte: Modificado de Basilici (2012).

Para Fernandes e Coimbra (1994) essa sequência sedimentar foi depositada em uma bacia sedimentar individualizada, ao passo que Milani et al. (2007), baseados no estudo dos aspectos evolutivos das bacias sedimentares brasileiras, classificaram as rochas da Bacia Bauru como sendo uma sequência aloestratigráfica da Bacia do Paraná, que recebeu o nome de Supersequência Bauru.

Esse pacote rochoso foi formado durante o Neocretáceo, no centro-sul da Plataforma Sul-Americana, em decorrência de processos de compensação isostática posteriores à fragmentação do supercontinente Gondwana e à extrusão das rochas basálticas da Formação Serra Geral (MILANI et al., 2007).

Segundo esses autores, cessadas as atividades vulcânicas e promovidos os ajustes isostáticos posteriores, definiu-se uma depressão sobre o pacote basáltico onde viriam a se acumular os sedimentos da Bacia Bauru. A carga de material siliciclástico, proveniente de alteração e erosão de rochas paleozoicas e pré-cambrianas expostas nas bordas da bacia, alcançou o interior após erosão e transporte por centenas de quilômetros e foi depositado (MILANI et al., 2007).

A Bacia Bauru constitui portanto uma unidade siliciclástica psamítica acumulada em condições semiáridas a desérticas. O contato basal é discordante (não-conformidade), sobretudo com basaltos da Formação Serra Geral e em sua base, geralmente, ocorre delgado estrato de aspecto brechóide com clastos angulosos de basalto e matriz arenosa imatura (MILANI et al., 2007).

Em termos litoestratigráficos, a Bacia Bauru ainda é objeto de muitas discussões e incertezas. Diversos autores procuraram definir o relacionamento estratigráfico entre as diversas fácies e/ou conjunto de fácies, mas tendo em vista a não ocorrência delas em toda a extensão da bacia e suas complexas relações de contato, é difícil relacioná-las e sistematizá-las.

Alguns trabalhos clássicos tentaram estabelecer uma divisão estratigráfica para a Bacia Bauru. O primeiro estudo das rochas suprabasálticas aflorantes no Estado de São Paulo foi realizado por Gonzaga de Campos (1905), nas proximidades de Bauru. As primeiras representações

em mapas da distribuição litológica das então formações Bauru e Caiuá foram feitas por Florence e Pacheco (1929) e Maack (1941).

Com a continuação dos estudos, descrição de novas fácies e aumento de dados disponíveis, Soares et al. (1980) propuseram a elevação da Formação Bauru à categoria de Grupo Bauru, constituído por quatro formações: Formação Caiuá, Formação Santo Anastácio, Formação Adamantina e Formação Marília.

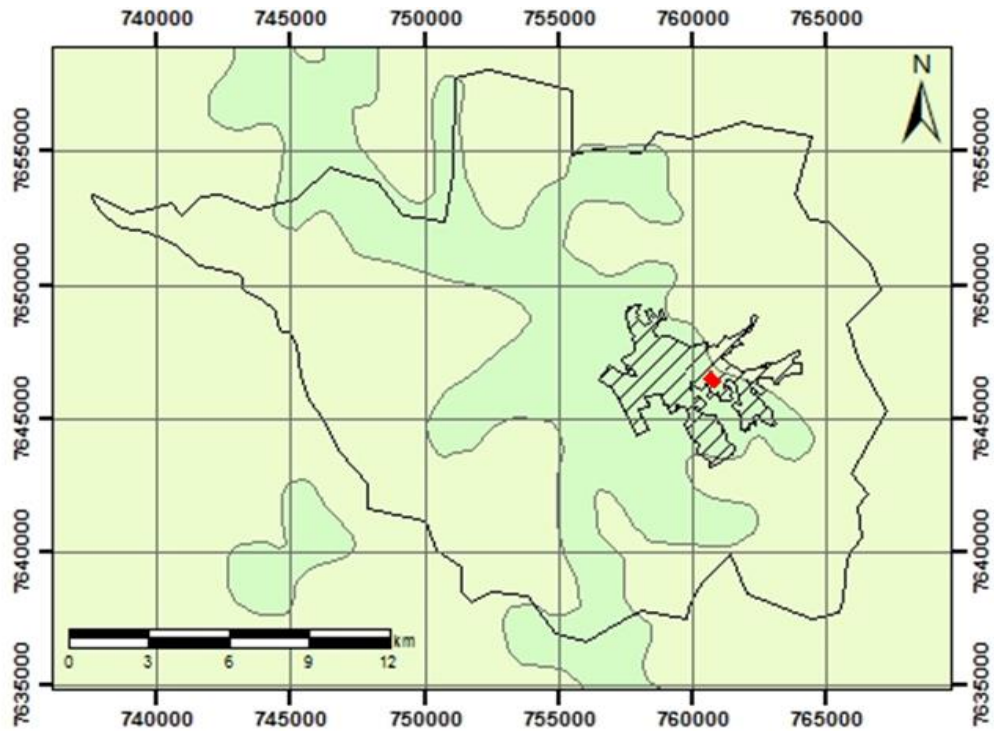
Fernandes e Coimbra (1994) apresentaram uma nova divisão, desta vez alçando a Formação Caiuá à condição de Grupo Caiuá, composto pelas formações Rio Paraná, Goio Erê e Santo Anastácio. Enquanto que o Grupo Bauru passou a encerrar as formações Adamantina, Marília, Uberaba e as rochas extrusivas alcalinas conhecidas como Analcimitos Taiúva.

Em nova proposta de classificação para o Grupo Bauru, Fernandes e Coimbra (2000) estabeleceram a seguinte estratigrafia: Formação Vale do Rio do Peixe (antes Formação Adamantina), Formação Araçatuba, Formação Uberaba, Formação Marília, Formação São José do Rio Preto, Formação Presidente Prudente e as rochas extrusivas alcalinas Analcimitos Taiúva.

No presente trabalho adota-se essa última proposta de divisão estratigráfica, na qual a Bacia Bauru é formada pelos grupos cronocorrelatos Caiuá e Bauru e ocorre a passagem lateral gradual e interdigitada entre eles (Figura 06).

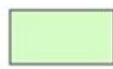
4.4.1 Contexto estratigráfico na região estudada

Na área do município afloram rochas pertencentes as formações Vale do Rio do Peixe e Marília, ambas pertencentes ao Grupo Bauru (Figura 07). A Formação Vale do Rio do Peixe aflora principalmente na região situada a SSW da cidade de Monte Alto, em direção à cidade de Taquaritinga, com relevo menos acentuado e mais homogêneo (MANZINI, 1990).



Legenda

Unidades Geológicas



- Formação Marília



- Formação Vale do Rio do Peixe



- Cemitério da Saudade



- Área Urbana



- Limite Municipal

Figura 07: Mapa geológico da região de Monte Alto. Fonte: Modificado de CPRM et. al. (2005).

A Formação Vale do Rio do Peixe compreende estratos tabulares de arenitos finos a finos marrons claros rosados a alaranjado, de seleção moderada a boa, intercalados com siltitos ou lamitos arenosos de cor creme a marrom, maciços ou com estratificação plano-paralela pouco definida, fendas de ressecção e feições tubulares (bioturbação). Os arenitos têm aspecto maciço ou estratificação cruzada tabular e acanalada de médio a pequeno porte ou estratificação/laminação plano-paralela grosseira (superfícies onduladas com *climbing ripples* eólicos, ondulações de adesão e planos com lineação de partição). Corresponde a depósitos eólicos de extensas áreas planas de lençóis de areia e campos de dunas baixas, com depósitos de *loesse* retidos em corpos aquosos efêmeros (MILANI *et al.*, 2007).

A Formação Marília aflora em grande parte na região da zona urbana do município e é composta por três membros: Serra da Galga, Ponte Alta e Echaporã. Os dois primeiros ocorrem principalmente no Triângulo Mineiro (MG), enquanto que o membro Echaporã ocupa grandes áreas do Planalto Ocidental Paulista e importantes porções nos estados de Goiás e Mato Grosso do Sul (BARCELOS & SUGUIO, 1987).

Segundo Milani *et al.* (2007), o Membro Echaporã é constituído por estratos tabulares maciços em geral de 1 metro de espessura, de arenitos finos a médios, imaturos, com frações grossas e grânulos em quantidades subordinadas, de cor bege a rosa-pálida.

Em geral, os estratos têm maior desenvolvimento de nódulos e crostas carbonáticas no topo, e, às vezes, discreta concentração de clastos na base. Raramente exibem estratificação cruzada de médio porte. As litofácies conglomeráticas, de poucos centímetros de espessura, são constituídas por intraclastos centimétricos (carbonáticos e lamíticos) e por extraclastos silicosos (quartzo, quartzito e arenito silicificado, alguns deles ventifactos).

São frequentes intercalações de delgadas lentes de lamitos arenosos de cor marrom de espessuras centimétricas a decimétricas (até 1 m), de base côncava e topo horizontal.

O Membro Echaporã formou-se como depósitos de lençóis de areia, onde se desenvolveram calcretes freáticos e pedogenéticos (MILANI *et al.*, 2007).

4.5 Hidrologia e Hidrogeologia

O município de Monte Alto está inserido na Bacia Hidrográfica do Turvo/Grande (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos - UGRHI 15), mais especificamente nas sub-bacias do Ribeirão do Onça e do Alto Turvo, cursos d'água que nascem no município.

Dentre as atividades econômicas na Bacia, existe uma interação entre as atividades agrícolas e industriais, sendo esta uma das características principais do desenvolvimento regional. No setor agrícola as atividades de maior intensidade são a cana-de-açúcar, laranja, seringueira e a fruticultura de

modo geral como supridoras de matéria prima para a agroindústria, voltando-se inclusive para a exportação.

Quanto às águas subterrâneas, de acordo com o Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo: escala 1:1.000.000 (DAEE et. al., 2005), Monte Alto encontra-se na área de influência do Aquífero Bauru (Figura 08).

O Aquífero Bauru ocupa aproximadamente a metade oeste do território do Estado de São Paulo, possuindo uma área aproximada de 96.880 km². Os limites desse aquífero no Estado de São Paulo compreendem a oeste e noroeste o rio Paraná, a norte o rio Grande, a sul o rio Paranapanema e áreas de afloramento da Formação Serra Geral, que delimitam também o aquífero na região leste.

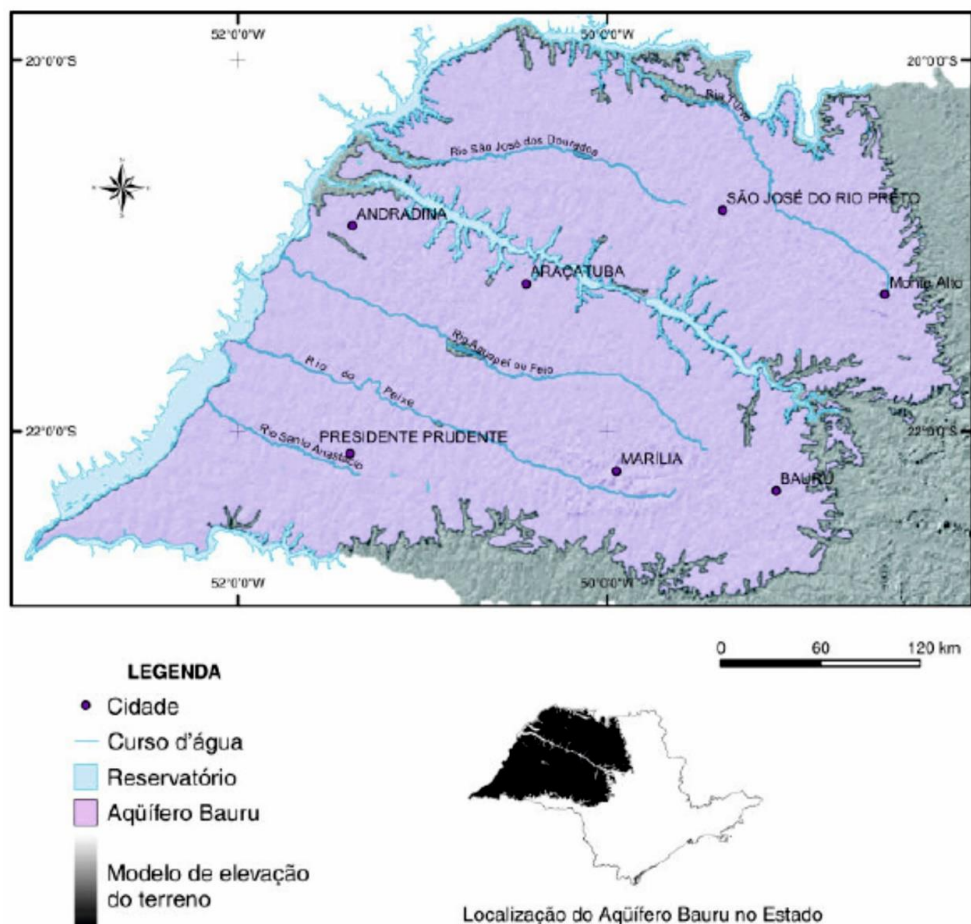


Figura 08: Mapa de localização do Aquífero Bauru no Estado de São Paulo. Fonte: Retirado de DAEE et. al. (2005).

O Aquífero Bauru é constituído pelas rochas sedimentares dos Grupos Bauru e Caiuá. Considerando as condições de armazenamento e circulação das águas, essas formações geológicas foram classificadas nas seguintes unidades hidroestratigráficas: Bauru Médio/Superior (Grupo Bauru) e Bauru Inferior/Caiuá (Grupo Caiuá). Ambas as unidades ocorrem de forma livre a localmente confinada e apresentam porosidade granular e contínua, sendo esta porosidade não uniforme, para a primeira unidade, e uniforme, para a segunda. A espessura saturada média do aquífero é da ordem de 75 metros.

As cotas topográficas da base do aquífero são de aproximadamente 600 m de altitude nas áreas próximas às cuestas basálticas, com tendência de diminuição no sentido oeste da área de ocorrência, atingindo até 100 m acima do nível do mar, na região de Presidente Epitácio.

O sentido do escoamento regional das águas subterrâneas se dá em direção às drenagens principais, como os rios Turvo, Preto, São José dos Dourados, Tietê, Aguapeí, Peixe e Santo Anastácio, além dos já citados Paraná e Paranapanema, principais exutórios de água do sistema.

A condutividade hidráulica do Aquífero Bauru varia de 0,002 m/d a 3,66 m/d, segundo dados de ensaios de recuperação realizados em 103 poços. Com base na análise dos mesmos ensaios, concluiu-se que a transmissividade do sistema varia de 0,14 a 328 m²/dia, ocorrendo predominância de valores inferiores a 50 m²/dia. A porosidade efetiva situa-se em torno de 5% no Bauru Médio/Superior, variando de 10 a 15% no Bauru Inferior/Caiuá (DAEE et. al., 2005).

De acordo com DAEE (1979), as águas do Aquífero Bauru apresentam, de modo geral, baixa concentração salina. O pH varia de ácido (4,59) a básico (9,64), com predominância de águas bicarbonatadas cálcicas (58%), nas áreas de planaltos e espigões.

4.6 Geomorfologia

A área abrangida pelo Estado de São Paulo apresenta diferentes tipos de relevo em toda sua extensão. Almeida (1964) estabeleceu uma hierarquização em função das diferentes fisionomias morfológicas e

embasamento geológico que reconheceu no estado. Dessa forma, ele classificou as seguintes províncias geomorfológicas: Planalto Atlântico, Província Costeira, Depressão Periférica, Cuestas Basálticas e Planalto Ocidental.

A região de estudo está inserida no contexto do Planalto Ocidental Paulista, que ocupa praticamente 50% da área total do estado. Segundo Mezzalira (1974), o relevo do Planalto Ocidental Paulista, área de afloramento do Grupo Bauru, é de modo geral extremamente suave, levemente ondulado, exceto nas proximidades das cuestas basálticas.

Nesse contexto geomorfológico, destacam-se platôs residuais, sustentados pelas rochas areníticas do Grupo Bauru com forte cimentação carbonática. Estes platôs foram definidos como zonas, denominadas de Planalto de Marília, Planalto de Monte Alto e Planalto de Catanduva.

Nas regiões mais acidentadas, o relevo torna-se mais escarpado, com desníveis de cerca de 100 metros, devido à presença de cimento carbonático, que tornou as rochas mais resistentes à erosão.

O relevo do Planalto de Monte Alto apresenta colinas amplas e médias compondo a superfície de cimeira, sendo também circundados por relevos de transição tipo escarpas festonadas e encostas sulcadas por vales subparalelos. É divisor de águas dos rios Tietê, Turvo e Mogi-Guaçu, estendendo-se entre os municípios de Monte Alto e Taiúva. A oeste é limitado pela Serra de Jaboticabal, cujo ponto culminante está a 722 metros, e a leste pelo limite do relevo de colinas médias que caracteriza seu topo (MANZINI, 1990).

O Cemitério da Saudade encontra-se localizado no divisor de águas das bacias hidrográficas do Rio Turvo e do Córrego Rico, em altitudes compreendidas entre 706 e 721 metros, com declividade em torno de 4%, ou seja, apresenta leve inclinação no sentido Sul. O mapa topográfico da área de estudo está apresentado a seguir (Figura 09).



Figura 09: Mapa topográfico da área do Cemitério da Saudade.

4.7 Pedologia

Rueda (1985) analisou cinco perfis de solo da região de Monte Alto. No seu estudo ele observou a ocorrência de serranias, chapadões ou planaltos constituídos e dominados por sedimentos da Formação Marília. Os sedimentos apresentam na mesma formação variações litológicas, que podem levar a diversos tipos de gênese de solos.

Em geral os solos na região de Monte Alto apresentam cor variando entre cinza avermelhado e vermelho ferrugem no horizonte A, pardo avermelhada até vermelha no horizonte B, pardo amarelo claro a vermelho escuro no horizonte C. A classe textural é a areia no horizonte A, argilo arenosa no horizonte B e argilo arenosa, até argilosa no horizonte C. Estrutura granular e fraca no horizonte A, prismática fraca a muito fraca no horizonte B e maciça nos horizontes de transição B e C, com presença de cerosidade.

4.8 Clima

O clima do município pode ser classificado como sendo tropical de altitude, em que a temperatura média do mês mais frio é inferior a 18 °C e a do mês mais quente ultrapassa 22 °C, apresentando inverno seco e verão chuvoso. O total das chuvas no mês mais seco não vai além de 30 mm e o índice pluviométrico deste tipo climático varia de 1100 a 1400 mm segundo o sistema de Köppen (MANZINI, 1990).

5 CONCEITOS SOBRE MÉTODOS GEOFÍSICOS

Para atingir os objetivos propostos por essa pesquisa, foi empregado o método geofísico da eletrorresistividade na área de estudo. A seguir serão abordados todos os aspectos teóricos e práticos que envolvem a aplicação dos métodos.

5.1 Geofísica Aplicada

Reynolds (2011) divide a Geofísica Aplicada em dois grupos distintos: os métodos passivos e os métodos ativos. Os métodos passivos (também chamados de potenciais) são aqueles que detectam variações nos campos naturais associados a um dado parâmetro físico, como os campos gravitacional e magnético, e então, a partir do registro desse sinal são processados e interpretados. Já os métodos ativos se utilizam de sinais criados artificialmente, que são transmitidos em subsuperfície, para prover informações que serão captadas pela instrumentação utilizada e, posteriormente, interpretadas. É o caso dos métodos sísmicos e geoelétrico, por exemplo.

Ao longo do tempo houve um considerável aprimoramento das técnicas de aquisição de dados, da instrumentação utilizada, assim como no processamento e na interpretação dos dados obtidos através da Geofísica Aplicada.

A partir das décadas de 1970 e 1980, a utilização dos métodos geofísicos começou a ter mais destaque também na engenharia civil, hidrogeologia e em estudos ambientais, voltada agora para a investigação de alvos relativamente mais rasos (GANDOLFO, 2007).

Como houve um aumento na gama de aplicações, a Geofísica Aplicada foi desenvolvendo subdisciplinas, caracterizadas de acordo com o tipo de emprego dos métodos, como, por exemplo, a Geofísica de Engenharia e a Geofísica Ambiental (REYNOLDS, 2011; GREENHOUSE, 1996).

O Manual de Áreas Contaminadas da CETESB (2001) recomenda o uso de métodos geofísicos nas etapas de investigação ambiental, por se tratar de uma metodologia não destrutiva e de rápida execução, e ainda de custo

relativamente baixo. Tem como objetivo básico a identificação da presença de contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

É dentro desse contexto que foi utilizada este método no presente trabalho. Pelas características da área de estudo, o tipo de contaminante investigado e os objetivos propostos, optou-se pela aplicação do método geoeletrico da eletrorresistividade.

Na classificação dos métodos geofísicos aplicados, os métodos geoeletricos constituem um grande grupo no qual se inserem os métodos elétricos e os eletromagnéticos (Figura 10). Ambos caracterizam-se por medir em superfície (ou no interior de furos de sondagens) a resposta do substrato geológico à excitação por campos elétricos ou eletromagnéticos de origem natural ou artificial (WARD, 1990).

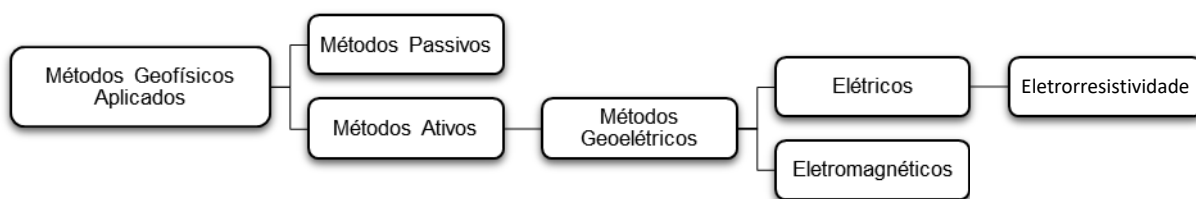


Figura 10: Esquema da classificação dos métodos geofísicos aplicados.

O método da eletrorresistividade visa medir a resistência elétrica dos materiais geológicos em subsuperfície, que é o parâmetro físico que expressa a dificuldade encontrada pela corrente elétrica para se propagar em um determinado meio.

A resistência elétrica nos solos e nas rochas está relacionada aos seguintes fatores predominantes: porosidade, composição mineralógica, grau de saturação, tipo de fluido de preenchimento dos poros, tamanho e forma das partículas sólidas (ORELLANA, 1972).

A propagação da corrente, nos solos e rochas, pode ocorrer através de três mecanismos de condução: eletrônica, através de uma matriz rochosa que possui elétrons livres, fazendo-a assim um bom condutor, como por exemplo os

minerais metálicos; dielétrica, que ocorre em materiais isolantes onde os elétrons estão fortemente ligados aos seus núcleos atômicos; e iônica ou eletrolítica, que se dá através de íons existentes na água contida nos poros interconectados, fissuras e fraturas do maciço rochoso (LOWRIE, 2007).

Como os minerais, em sua maioria, não são bons condutores de corrente elétrica (isolantes), à exceção de alguns metais nativos e de compostos semi-metálicos, a condução de corrente nos solos e rochas é predominantemente eletrolítica, pois se faz através de um eletrólito, nesse caso a água subterrânea. Esse fenômeno depende da porosidade da rocha e da saturação desses poros, que são parâmetros muito variáveis nas rochas (TELFORD, 1990; LOWRIE, 2007).

Analisando o comportamento de materiais geológicos em porções rasas da crosta, solos com texturas mais finas tendem a conduzir melhor a corrente elétrica do que solos areníticos, devido às características cristalográficas de seus minerais, que mantêm a água por adesão. Em solos superficiais os valores de resistividade variam de acordo com as variações de compactação e as alterações no teor de umidade do mesmo. Grandes variações da resistividade geralmente são verificadas nos horizontes mais superficiais.

5.2 O método da eletrorresistividade

O principal objetivo da utilização do método da eletrorresistividade é determinar a resistividade elétrica dos materiais geológicos em subsuperfície. O método é de simples execução, pode ser aplicado com instrumentação igualmente simples e, desta forma, implica num baixo custo. Por este motivo, além dos resultados satisfatórios que geralmente apresenta, encontra uma vasta aplicação em geologia básica, estudos hidrogeológicos, na mineração, e nas áreas de meio ambiente e geologia de engenharia.

A dinâmica do método consiste na introdução de corrente elétrica no solo (contínua ou de baixa frequência), produzida por uma fonte artificial através de dois eletrodos de corrente (A e B), produzindo um campo elétrico potencial. As diferenças de potencial resultantes desses campos são então medidas na superfície por meio de dois eletrodos de potencial (M e N), como

mostra a Figura 11 (Knodel et al 2007). Com o conhecimento do valor da corrente e dos valores das diferenças de potenciais é possível calcular a variação da resistividade elétrica do meio pela Lei de Ohm como será descrito a seguir.

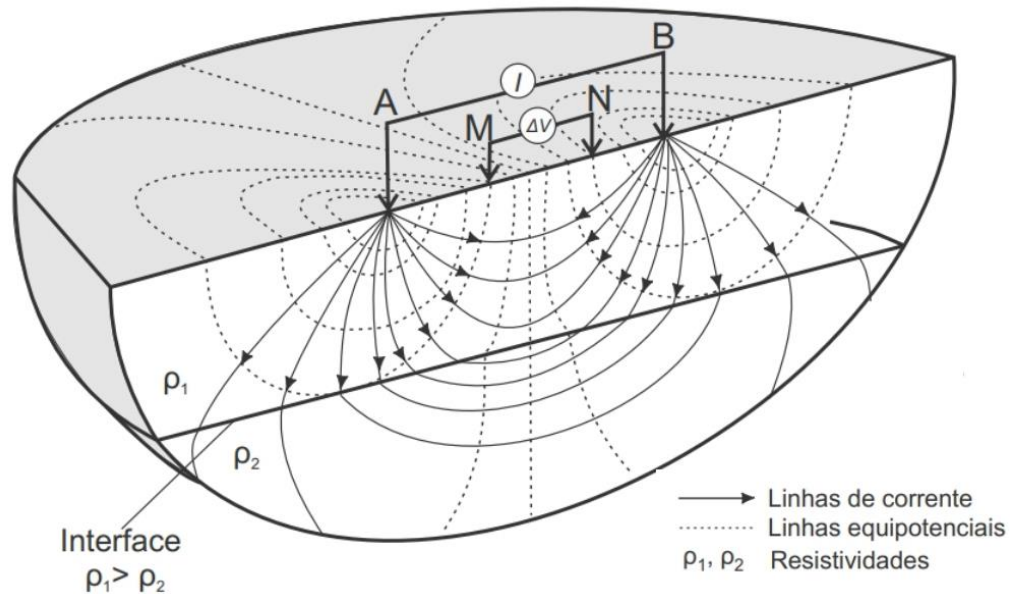


Figura 11: Princípio do método da eletrorresistividade com arranjo de quatro eletrodos. Fonte: Modificado de Knodel et al 2007.

5.2.1 Fundamentos teóricos

O caso mais simples que serve de partida para o desenvolvimento da teoria do método da eletrorresistividade é o de um semi-espaco homogêneo e isotrópico, com resistividade elétrica (ρ) uniforme.

A partir de uma fonte pontual A (um eletrodo disposto no solo) injetando corrente num meio homogêneo e isotrópico, é possível fazer a dedução físico-matemática do método. A corrente percorre várias direções como mostra a Figura 12. A princípio, o circuito de corrente é completado por uma segunda fonte B a uma distância muito grande do primeiro, de tal forma que sua influência pode ser negligenciada, conforme ilustra a Figura 12.

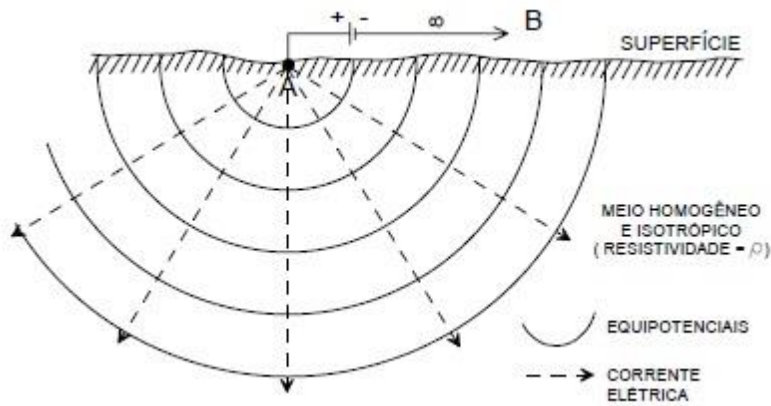


Figura 12: Semi-espaço homogêneo e isotrópico com uma fonte pontual de corrente. Fonte: Modificado de Lowrie (2007).

A equação que fornece o potencial devido a uma única fonte pontual de corrente pode ser deduzida a partir da lei de Ohm (KELLER & FRISCHKNECHT, 1966).

Pela Lei de Ohm, a corrente elétrica I que flui através de um condutor é proporcional ao potencial elétrico U gerado por essa passagem:

$$U = R.I \quad (\text{eq.1})$$

onde R é a resistência elétrica do condutor, dada em ohm (Ω).

Como a resistência é uma grandeza que mede a dificuldade de um corpo em transmitir a corrente elétrica, onde a geometria do corpo também exerce influência, considera-se um corpo cilíndrico de um material homogêneo de comprimento L e seção transversal S , a resistividade elétrica ρ deste corpo será dada por (ORELLANA, 1972; TELFORD, 1990):

$$\rho = R \cdot \frac{S}{L} \quad (\text{eq.2})$$

onde a resistividade é dada em unidades de ohm.m ($\Omega.m$) no Sistema Internacional de unidades (SI).

Ao se injetar uma corrente elétrica no meio, de acordo com Lowrie (2007), o campo elétrico E que se estabelece na fonte gera uma densidade de corrente J , proporcional à resistividade do meio ρ . A densidade de corrente é

igual a corrente I dividida pela área de onde a corrente se propaga, um hemisfério de raio r , como mostra a equação 3:

$$E = \rho \cdot J = \rho \cdot \frac{I}{2\pi r^2} \quad (\text{eq.3})$$

Correlacionando com a Lei de Ohm, já que o campo elétrico também pode ser expresso através do potencial elétrico, entre duas cargas, pela distância r entre elas ($E = U/r$), o potencial elétrico é dado por:

$$U = \rho \frac{I}{2\pi r} \quad (\text{eq.4})$$

Como na prática o método da eletrorresistividade utiliza dois eletrodos, (um único eletrodo é incapaz de gerar corrente elétrica), essa relação fundamental (eq. 4) é para se determinar a resistividade elétrica.

Considerando um arranjo constituído por quatro eletrodos, o primeiro par de eletrodos (A e B) é convencionado como sendo os eletrodos de corrente, a partir dos quais é aplicada uma corrente elétrica em subsuperfície. Este circuito é conectado a um amperímetro, por meio de cabos elétricos, como mostra a Figura 13.

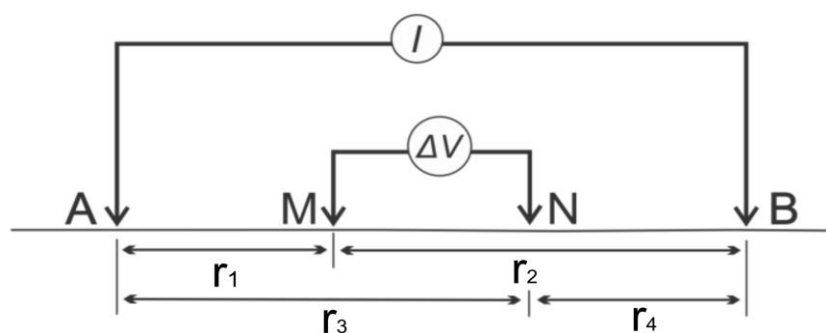


Figura 13: arranjo básico do método da eletrorresistividade com quatro eletrodos. Fonte: Adaptado de Lowrie (2007).

O segundo par de eletrodos (M e N) é convencionado como sendo os eletrodos de potencial, utilizados para medir a diferença de potencial criada pelo circuito de corrente. Este circuito, por sua vez, é conectado a um voltímetro capaz de medir a diferença de potencial entre eles.

No caso de medidas de resistividade em meios homogêneos, o valor calculado representaria a resistividade verdadeira do meio. Entretanto, como o meio geológico é constituído de heterogeneidades intrínsecas, as medidas de resistividade neste caso representam resistividades próximas das verdadeiras (resistividade aparente), cujo produto calculado é denominado de “resistividade aparente” (ρ_a), a ser definida no item 5.3.

O potencial elétrico U resultante no ponto M devido a uma corrente I circulando entre os eletrodos A e B, sendo r_1 a distância entre M e A, e r_2 a distância entre M e B, será dado por:

$$U_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right] \quad (\text{eq.5})$$

Analogamente, o potencial em N poderá ser calculado da mesma forma. Na prática mede-se em campo, não um potencial, mas sim uma diferença de potencial entre dois eletrodos. Então, a diferença de potencial entre M e N será:

$$\Delta U_{MN} = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right] \quad (\text{eq.6})$$

A resistividade ρ pode então ser expressa por:

$$\rho = \frac{\Delta U}{I} \cdot 2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (\text{eq.7})$$

Dessa equação, define-se o fator geométrico K, dado por:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]^{-1} \quad (\text{eq.8})$$

E finalmente tem-se:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (\text{eq.9})$$

A constante K tem dimensões de comprimento e depende unicamente da geometria relacionada à disposição dos quatro eletrodos (A, B, M e N) em superfície, tratando-se de um fator que leva em conta a diminuição do potencial com a distância.

A geometria dos dipolos AB e MN no momento da medida definem o fator geométrico K, utilizado para o cálculo da resistividade elétrica (ρ). Os quatro eletrodos podem assumir qualquer disposição geométrica sobre a superfície do terreno. As diferentes disposições recebem o nome de “arranjos”. Muitos destes, comumente utilizados nos levantamentos de campo, recebem nomes especiais (Schlumberger, Wenner, dipolo-dipolo, pólo-dipolo, pólo-pólo, gradiente etc.), apresentando características peculiares, vantagens e desvantagens uns em relação aos outros.

5.3 Resistividade aparente

Em um semi-espaco homogêneo e isotrópico, a resistividade elétrica real pode ser calculada pela equação 9, onde será obtido o mesmo valor qualquer que seja o arranjo utilizado na execução das medidas. Porém, como a Terra não é homogênea e nem isotrópica, o valor da resistividade elétrica varia, tanto lateralmente como em profundidade.

Em decorrência desse fato, o valor medido em superfície irá variar para cada posição, assim como para a disposição e/ou tamanho do arranjo de eletrodos utilizado.

O conceito de resistividade aparente (ρ_a) surge aí, já que a resistividade que se obtém aplicando-se a expressão definida para meios homogêneos é calculada sobre dados que foram obtidos a partir de um meio heterogêneo. A equação 10, desta forma, pode ser expressa de forma melhor por:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta U}{I} \quad (\text{eq.10})$$

A resistividade aparente é expressa em ohm.m da mesma forma que a resistividade real, e se constitui na base para a interpretação dos dados no método da eletrorresistividade. Não é propriamente um parâmetro físico do meio e sim um valor que representa o efeito integrado do semi-espaco sobre o qual a medida é efetuada. A resistividade aparente é uma resultante que sofre a influência das diversas resistividades existentes no volume investigado (ORELLANA, 1972).

5.4 Técnica de investigação e arranjos de campo

5.4.1 Generalidades

No método da eletrorresistividade, existem dois grupos de técnicas principais de investigação de subsuperfície, que são: (1) a sondagem elétrica vertical (SEV), que investiga a variação vertical da resistividade em profundidade; e as (2) técnicas que mapeiam a variação lateral da resistividade ao longo de uma profundidade constante.

No presente trabalho foram utilizadas as técnicas de SEV e imageamento elétrico, definida por Ward (1990) como a combinação de investigações verticais e laterais da variação da resistividade em um mesmo levantamento.

Várias são as possibilidades de arranjos de eletrodos possíveis de se utilizar na aplicação do método da eletrorresistividade, como pode ser encontrado na bibliografia (ORELLANA, 1972, entre outros). Porém, apenas alguns são efetivamente empregados na prática, seja pelo meio técnico ou acadêmico, em trabalhos e pesquisas.

A escolha do arranjo a ser utilizado depende de alguns fatores, como: o tipo de alvo a ser mapeado, a razão sinal/ruído, a profundidade de investigação almejada, etc. Como um dos objetivos desse trabalho foi testar a resposta que

diferentes configurações de eletrodos oferecem em um meio físico alterado, foram utilizados três tipos de arranjo: o Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo

As medidas normalmente são tomadas ao longo de um perfil, definindo-se uma abertura ou espaçamento entre eletrodos e progredindo sobre o perfil do levantamento. A profundidade de investigação está relacionada ao espaçamento entre os eletrodos, que aumenta à medida que a distância entre eles cresce, e também com o fator de separação entre eletrodos de corrente e potencial.

Para a definição de qual o melhor espaçamento a se utilizar, ou do máximo fator de separação (maior nível de investigação), deve ser estimada a profundidade na qual o alvo se encontra, assim como as prováveis dimensões do mesmo, qualquer que seja o arranjo utilizado.

O “sinal” no método da eletrorresistividade refere-se à magnitude da diferença de potencial (ΔU) lida, entre os eletrodos de potencial, para um dado valor de corrente injetado no solo. Valores muito pequenos de ΔU podem estar na ordem de grandeza do ruído local, resultando em um dado de confiabilidade duvidosa ou mesmo impossibilitando a execução de uma boa leitura em campo (GANDOLFO, 2007).

A resolução das imagens que serão geradas também é um fator de extrema importância na aplicação de diferentes arranjos, seja ela vertical ou horizontal. Essa característica está diretamente ligada à densidade de pontos de medidas nas direções X e Z. Especificamente para o caso da eletrorresistividade, WARD (1990) analisa o desempenho de diversos arranjos quanto à resolução, tanto lateral como vertical, como pode ser visto na Tabela 02.

Arranjo	Resolução lateral	Resolução vertical
Gradiente	1	5
D-D	2	2
P-D	3	2
Schlumberger	4	1
Wenner	5	1

Tabela 02: Avaliação dos arranjos quanto à resolução. 1: melhor; 2: segundo melhor; 3: terceiro melhor; 4: quarto melhor; 5: pior. Fonte: Ward (1990).

5.4.2 Arranjo Wenner

Neste tipo de arranjo quatro eletrodos igualmente espaçados são dispostos em uma linha. Chama-se de “a” a distância entre eles. Com essa distância “a” é alcançado um nível de investigação “n=1” como ilustra a Figura 14. Com o aumento da distância entre os eletrodos, esta sempre múltiplo de “a”, a profundidade de investigação atinge níveis mais profundos. Sendo que a distância “na” entre eletrodos AM, MN e BN é sempre mantida constante no decorrer do levantamento (Figura 14).

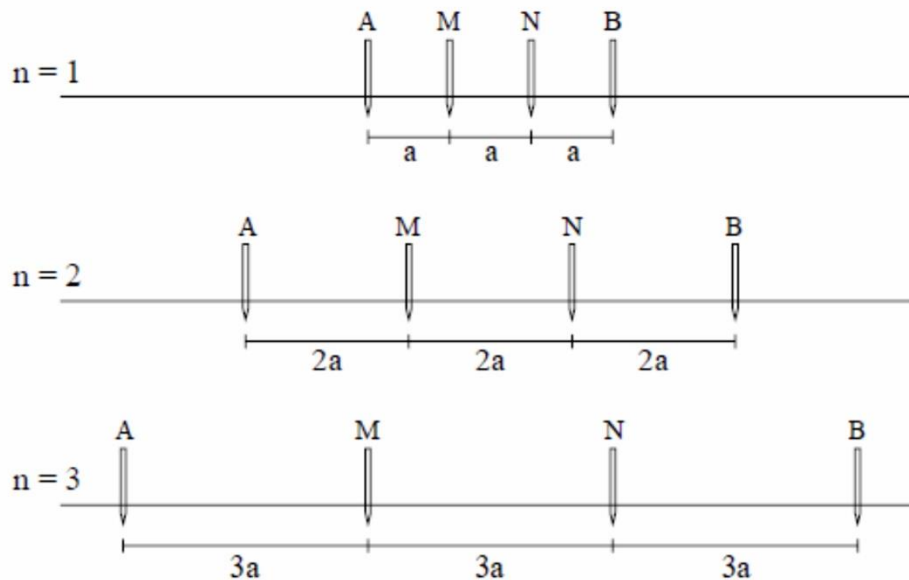


Figura 14: Disposição espacial do arranjo Wenner, sempre com espaçamento constante.

Fonte: Gandolfo (2007).

5.4.3 Arranjo Dipolo-Dipolo

No arranjo Dipolo-Dipolo mantém-se fixa a distância entre os eletrodos de corrente (AB), e também os de recepção (MN). Para uma distância fixa “a” como mostra a Figura 15, a distância entre os pares AB e MN deve ser múltipla de “a”, conforme vai-se realizando diferentes medidas. Geralmente mantém-se

fixo o par AB e vai-se locomovendo o par MN para se obter uma série de medidas, que conforme o aumento do fator “n.a” maior é a profundidade do nível de investigação. Tendo como limite de valor aceitável, as leituras de potencial superiores ao nível de ruído presente no local.

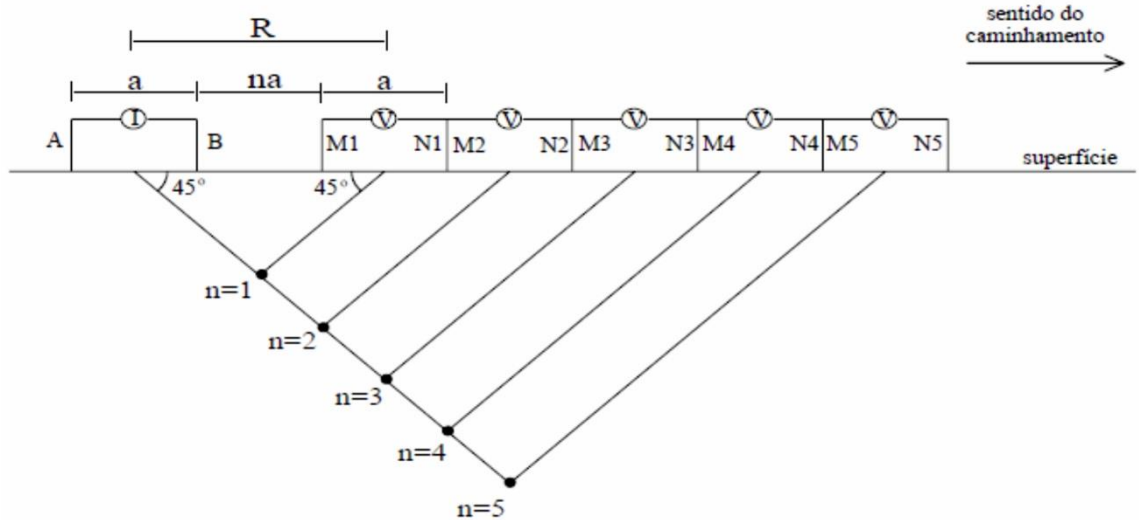


Figura 15: Disposição espacial do arranjo Dipolo-Dipolo. Fonte: Retirado de Gandolfo (2007).

Como mostra a Figura 15, o valor da resistividade elétrica aparente é representado em um ponto localizado na interseção das retas que partem a 45° do centro dos dipolos, no ponto médio entre estes, em subsuperfície. A constante K, nesse arranjo, pode ser expressa pela seguinte equação:

$$K = \pi \cdot a \cdot n(n + 1)(n + 2) \quad (\text{eq.11})$$

5.4.4 Arranjo Schlumberger

O Schlumberger é um arranjo simétrico em relação a um ponto central, com os eletrodos de corrente A e B, posicionados externamente aos eletrodos de potencial M e N. A abertura MN deve ser menor ou igual a um quinto da abertura AB, ou seja, $AB/MN \geq 5$ (Figura 16). Como consequência, mede-se com uma boa aproximação o gradiente do potencial, ou seja, o campo elétrico.

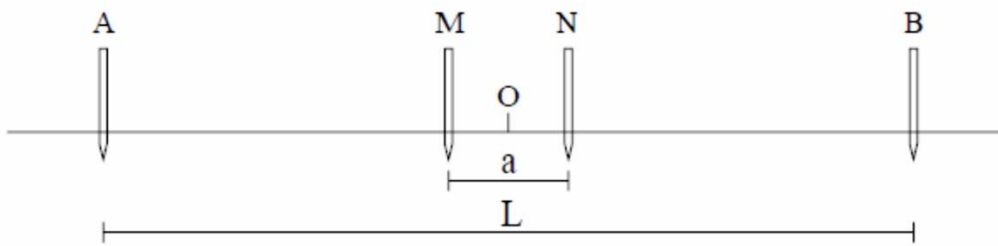


Figura 16: Disposição espacial do arranjo Schlumberger. Fonte: Retirado de Gandolfo (2007).

Para o cálculo do valor da resistividade aparente utilizando o arranjo Schlumberger, o fator geométrico K , é dado por:

$$K = \pi \frac{AM \cdot AN}{MN} \quad (\text{eq.12})$$

O arranjo Schlumberger possui boa resolução vertical, sendo assim largamente utilizado para a execução de Sondagens Elétricas Verticais (SEV). A SEV é uma técnica que tem por objetivo a determinação das variações da resistividade com a profundidade, em um ponto do terreno (Gandolfo, 2007). Desse modo determina as variações unidimensionalmente, a semelhança de um furo de sondagem. As medidas de resistividade aparente obtidas de uma SEV são apresentadas em gráficos com escala bilogarítmica, em função da metade da distância entre os eletrodos de corrente ($AB/2$).

5.5 Profundidade de investigação

A profundidade de investigação é um conceito de extrema importância na aplicação de qualquer método geofísico e, no caso da eletrorresistividade, esforços são empregados para estabelecer uma relação entre o espaçamento de eletrodos (e tipo de arranjo) na superfície com uma determinada profundidade efetiva de investigação. No entanto, é um assunto muito complexo, que não é totalmente elucidado.

Roy & Apparao (1971), prosseguindo os estudos para definição desse parâmetro, definiram profundidade de investigação como aquela na qual uma fina camada horizontal do terreno contribui o máximo para a totalidade do sinal medido em superfície. A partir disso, construíram curvas, calculando a contribuição individual de uma fina camada plana-horizontal para o sinal total em função das profundidades de cada uma das camadas, para vários arranjos de eletrodos. As curvas iniciam com valor zero na superfície, atingem um máximo e tendem novamente à zero em grandes profundidades. Este comportamento da curva permite a definição da profundidade de investigação para um determinado arranjo, sendo aquela onde a curva assume o valor máximo.

Na prática, estas contribuições individuais de cada camada horizontal não podem ser medidas, se observando de fato, medidas de potencial efetuadas na superfície que correspondem à contribuição total de todas as camadas dada pela área sob a curva. A Tabela 03 apresenta os valores obtidos por Roy & Apparao (1971) para o cálculo da profundidade de investigação, onde L é a distância entre os eletrodos de corrente de cada arranjo.

Arranjo	Profundidade
Wenner	$0,35.L$
Dipolo-Dipolo	$0,195.L$
Schlumberger	$0,125.L$

Tabela 03: Profundidade de investigação segundo Roy & Apparao (1971).

5.6 Pseudo-seções e inversão geofísica

Os dados de campo obtidos em imageamentos elétricos, qualquer que seja o arranjo utilizado, são geralmente apresentados sob a forma de pseudo-seções de resistividade elétrica aparente, um processo usual e bastante difundido para visualização dos dados, possibilitando boas interpretações qualitativas.

Na pseudo-seção cada ponto investigado em subsuperfície possui uma posição e profundidade teórica específica, de acordo com o espaçamento entre eletrodos e o arranjo eletródico utilizado na investigação. A utilização da interpretação qualitativa através de pseudo-seções não reflete a distribuição de resistividade elétrica verdadeira, nem a profundidade real do meio investigado (FACHIN, 2007). Sendo assim a escala vertical na pseudosseção não é exata.

Para a plotagem dos dados em uma pseudo-seção, utiliza-se uma metodologia desenvolvida por Hallof (1957). Tomando como exemplo o arranjo dipolo-dipolo ela é efetuada da seguinte forma: o valor da resistividade elétrica aparente é atribuído ao ponto, em subsuperfície, localizado na interseção de duas retas inclinadas a 45° que partem do centro dos dipolos AB e MN. A projeção deste ponto no eixo das abscissas (distância) corresponde ao ponto médio do arranjo, considerando os eletrodos extremos do mesmo (A e N), conforme ilustra a Figura 17.

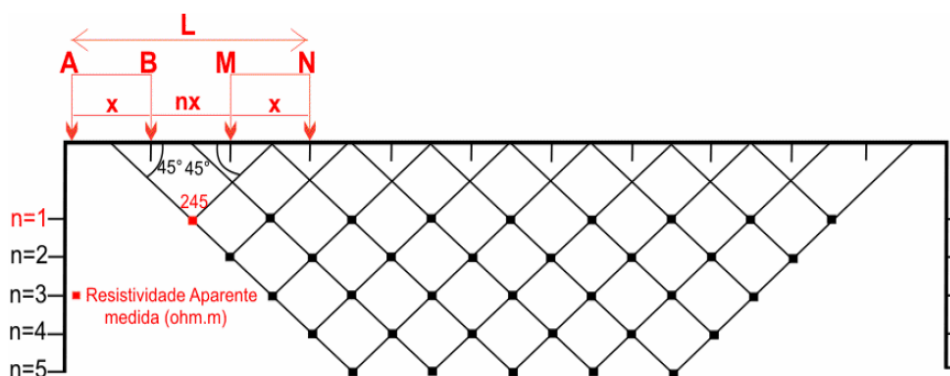


Figura 17: Plotagem convencional, arranjo D-D, proposta por Hallof (1957).

Cada linha horizontal na pseudo-seção, portanto, está associada a um nível de investigação “n”, resultando em uma representação apenas qualitativa das variações verticais da resistividade aparente. Neste tipo de plotagem, as profundidades representadas não estão relacionadas diretamente a nenhuma profundidade efetiva, não tendo um significado preciso (GANDOLFO, 2007).

Para se obter um modelo mais representativo de subsuperfície, os dados obtidos em campo podem passar por um processo de inversão geofísica via softwares específicos para este fim. Que determinam um modelo idealizado de

subsuperfície, baseado em um conjunto finito de dados observados, cuja resposta está em concordância com estes valores medidos.

O software Res2Div permite o processamento de grandes conjuntos de dados em duas dimensões e determinar, a partir de técnicas de modelagem numérica com o método da inversão, um modelo bidimensional da resistividade (GRIFFITHS; BARKER, 1993). Sendo assim, o objetivo da inversão geofísica é a tentativa de ajuste da resposta do modelo aos dados observados, dentro de um limite de erro pré-estabelecido.

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Dados Geofísicos

Os dados geofísicos de eletrorresistividade (imageamento elétrico tomográfico), de georreferenciamento e as seções de inversão já faziam parte do acervo de projeto de pesquisa em andamento do Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP – Rio Claro. Mas cabe ressaltar aqui a metodologia utilizada quando da coleta e processamento dos dados.

O emprego do método da eletrorresistividade, se deu através do resistivímetro *Terrameter* LS, da empresa sueca ABEM (Figura 18). O equipamento utilizado é um sistema automatizado, multicanal. O seu emprego tem a vantagem de permitir a obtenção de uma alta densidade de dados, na forma de aquisição multi-eletrodos, melhorando o imageamento da subsuperfície e o alcance de níveis de resolução desejáveis, independente do arranjo empregado. Esse ensaio foi realizado no mês de fevereiro de 2016.



Figura 18: Equipamento utilizado para execução da técnica do imageamento elétrico.

Dessa forma, a aquisição dos dados geofísicos foi realizada em 11 linhas de imageamento elétrico, totalizando 33 linhas, ou seja, 11 para cada arranjo (Wenner, Schlumberer e Dipolo-Dipolo) mais 1 linha de referência para cada arranjo. O comprimento das linhas varia de 108 a 170 metros cada e o espaçamento entre linhas de 23 a 40 metros, posicionadas nas ruas transversais do cemitério, como mostra a Figura 19. Para cada arranjo foram usados os mesmos comprimentos e espaçamentos entre linhas.



Figura 19: Mapa das linhas de IE.

As linhas de referência estão localizadas a cerca de 70m de distância do cemitério na praça à noroeste da área (montante), para servir como referência do meio não impactado. Assim, tem-se uma base dos valores de eletrorresistividade que podem ser considerados normais para o contexto em que se insere a área de estudo. Além de poder-se comparar as seções geofísicas do meio impactado (cemitério) com as seções do meio não impactado, sendo que ambos compartilham um mesmo arcabouço geológico/pedológico. As seções de referência servem como base para as interpretações das linhas executadas na área de estudo. O espaçamento entre eletrodos sempre foi de 3 metros.

6.1.1 SEV's e Mapa Potenciométrico

Dentro do projeto foi realizada também uma etapa de campo no Cemitério da Saudade, no mês de Junho de 2017. Dessa vez empregou-se o método da eletrorresistividade, arranjo Schlumberger, para a realização de 3 Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) na área do cemitério. Os espaçamentos AB foram de 100 m e 200 m, suficientes para atingir o nível freático, na área.

O equipamento utilizado para esta etapa de campo foi o *BISON* modelo 2390 da *BISON Instruments Inc* (USA), ilustrado na Figura 20, e pertencente ao Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP – Rio Claro.

Após a interpretação das SEV's, foram obtidas as profundidades da zona saturada. Utilizando o programa *Surfer* para processar os valores dessas profundidades (método da interpolação através da mínima curvatura), obteve-se o mapa potenciométrico da área do cemitério, a ser mostrado e discutido no item 7.3.



Figura 20: Equipamento e execução de uma SEV no Cemitério da Saudade

6.2 Georreferenciamento

O correto georreferenciamento da área de estudo é de vital importância para a confecção de mapas de isovalores confiáveis e de qualidade. A Prefeitura Municipal de Monte Alto não dispõe de cartas georreferenciadas do Cemitério da Saudade e os mapas topográficos na literatura não são de uma escala adequada para a realização desse trabalho.

Sendo assim, foi utilizado um GPS diferencial (DGPS) da marca Trimble, com antena integrada GPS/MSK beacon, receptor Navigation Pathfinder Pro XR 12 e coletor Recon para realizar o georreferenciamento adequado da área.

O uso do DGPS implica na aplicação de uma técnica de correção diferencial dos dados coletados em campo, através do receptor. Esses dados brutos podem sofrer com a combinação de diversos tipos de erro, como: pela órbita dos satélites, efeitos da troposfera e ionosfera, erros de processamento do receptor. Para realizar a correção diferencial é necessária pelo menos uma estação GPS de coordenadas perfeitamente conhecidas, para gerar correções de pseudodistância e suas variações. Os cálculos foram executados pelo programa GPS Pathfinder Office, que compara os dados obtidos pelo receptor com os dados da estação-base e faz a correção diferencial, resultando em pontos com maior precisão espacial.

Os aparelhos utilizados na pesquisa são propriedade do Laboratório de Geofísica, vinculado ao Departamento de Geologia Aplicada (DGA) do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP – Rio Claro.

6.3 Pesquisa Documental de sepultamentos

Os dados de sepultamentos no Cemitério da Saudade foram coletados através de pesquisa documental no prédio administrativo do mesmo, em livros e em um sistema informatizado de registros, a fim de se levantar o histórico de sepultamentos na área do cemitério. Assim foi possível correlacionar os locais de maior frequência de sepultamentos com as possíveis anomalias geofísicas encontradas.

Em janeiro de 2018, no escritório administrativo do Cemitério da Saudade na cidade de Monte Alto, foi feito um levantamento durante dois dias nos livros de registros a fim de se obter o número de sepultamentos por quadra nos últimos 5 anos, anteriores à execução dos ensaios geofísicos.

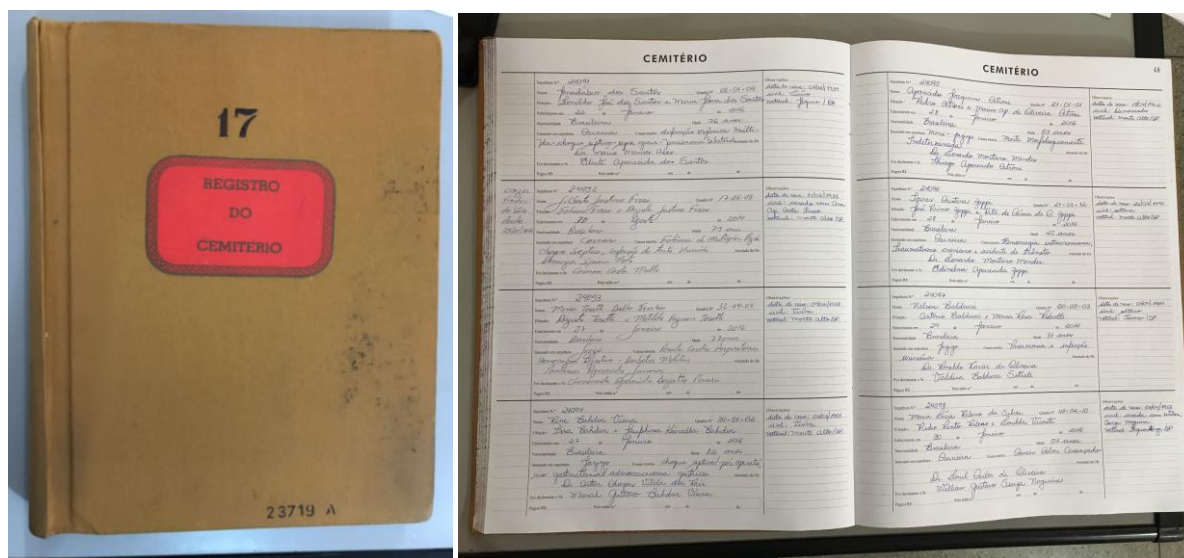


Figura 21: Registro em livro dos sepultamentos no Cemitério da Saudades.

O Cemitério da Saudade tem os seus sepultamentos distribuídos por quadras delimitadas, como mostra o mapa da área do cemitério a seguir (Figura 22):

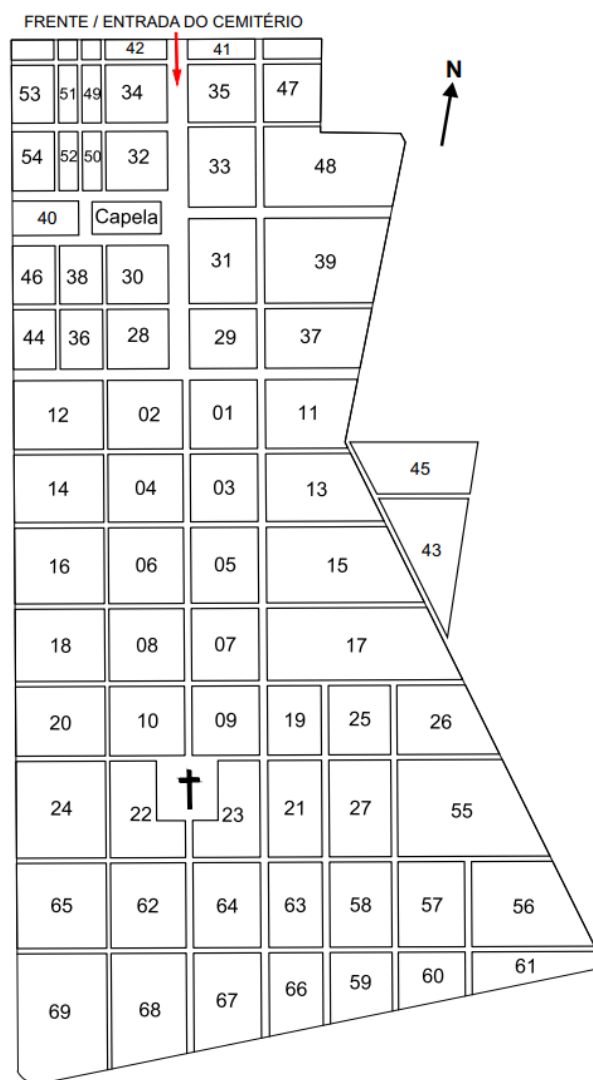


Figura 22: Mapa de Localização das quadras do cemitério.

O número de sepultamentos dos últimos 5 anos antes dos ensaios geofísicos, e suas respectivas quadras, foram correlacionados em forma de um mapa (item 7.1) que sobrepõe graficamente a frequência de sepultamentos ao mapa de quadras do cemitério. Foi estabelecida uma relação entre o raio das circunferências e o número de sepultamentos com base simplesmente no aspecto qualitativo visual, que melhor proporciona a visualização da intensidade dos sepultamentos.

6.4 Processamento dos dados geofísicos

Os dados colhidos das SEV's foram processados no software IX 1D v.3, tendo como resultado gráficos com escala bilogarítmica, que apresentam a variação da resistividade no terreno conforme o aumento da profundidade (em 1D). O algoritmo do programa calcula a curva de resistividade aparente, com base na teoria de filtragem linear, e assim alguns parâmetros podem ser modificados, tendo como base o conhecimento geológico prévio. Esses ajustes podem ser realizados também pelo método da inversão pelo qual busca-se uma convergência da curva teórica para a curva de campo, até que um melhor ajuste seja alcançado. O algoritmo utilizado nesse processo baseia-se no método dos mínimos quadrados (INTERPEX LIMITED, 2009). O produto final do processo é um modelo geoeletrico 1D da distribuição das resistividades com a profundidade, sob a SEV.

As seções de inversão (2D) foram geradas a partir do processamento dos dados de imageamentos elétricos com o auxílio do software RES2DINV V. 3.53. Já os modelos em 3D com o auxílio do software Oasis Montaj, plataforma Geosoft.

O software RES2DINV é um programa computacional muito utilizado na interpretação dos dados de imageamento elétrico, para realizar a inversão geofísica. Permite o cálculo, de forma automática, de um modelo bidimensional (2D) de resistividade elétrica em sub superfície, a partir dos dados obtidos em campo. A inversão dos dados pode corrigir as distorções observadas nas pseudo-seções e fornecer valores mais exatos das profundidades e das resistividades elétricas em subsuperfície.

A inversão de dados 2D de eletrorresistividade, sendo um problema não linear, necessita de um modelo inicial para o processo iterativo. Um modelo de terra homogênea constitui a mais simples suposição que pode ser utilizada como modelo inicial (LOKE & BARKER, 1995).

O software RES2DINV realiza o processo de inversão por suavização, que utiliza algoritmos baseados em um esquema de células, podendo ser efetuada sem que o usuário entre com um modelo geológico inicial (GEOTOMO SOFTWARE, 2007). Assim o modelo é determinado

automaticamente, considerando um semi espaço homogêneo com resistividade constante e igual à média dos logaritmos dos valores das resistividades aparentes da pseudo-seção.

Através deste método de inversão, o software Res2dinv reconhece a subsuperfície terrestre como retângulos que possuem valores constantes para o parâmetro investigado a partir do ajustamento das medidas de campo (DEGROOT-HEDLIN & CONSTABLE, 1990; LOKE & BARKER, 1996). A partir desta otimização, o modelo inicial é modificado de forma iterativa para que a diferença entre a resposta do modelo e os valores dos dados observados seja reduzida (LOKE, 2000). A diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo de blocos é expressa pelo erro RMS (Root Mean Square) (LOKE & BARKER, 1996). O procedimento para obtenção do erro RMS é comparável ao conceito de desvio padrão, cujas diferenças encontradas entre os valores medidos e os dados calculados são elevadas ao quadrado e somadas. A soma é, então, dividida pelo número de dados, para que se obtenha a média cuja raiz quadrada fornece um valor característico de erro na mesma unidade dos dados originais (FACHIN, 2007).

O RES2DINV adota os coeficientes empíricos estabelecidos por EDWARDS (1977) na plotagem dos pontos com relação às profundidades, conforme o arranjo utilizado. A profundidade da base dos blocos no modelo de discretização do meio é aproximadamente igual à profundidade proposta por este autor.

Para a confecção dos modelos em 3D procedeu-se da seguinte forma: os resultados gerados na inversão 2D foram exportados na forma de arquivos em tabela, um arquivo para cada tipo de arranjo; para cada ponto, que teve seu valor de resistividade medido nas seções 2D, foi associada à sua cota em profundidade, no arquivo em forma de tabela.

Esse arquivo contendo a informação espacial de cada ponto das seções foi importado no software Oasis Montaj, sendo os dados interpolados através do método da krigagem gerando-se modelos 3D de blocos. A partir da re-interpolação desses modelos de blocos pelo método da mínima curvatura, foram gerados mapas de diferentes níveis de profundidade para a variável

resistividade. Ao empilhar esses mapas de vários níveis temos outro tipo de modelos com efeito 3D, que estão contidos em anexo.

Ao todo foram gerados mapas de 10 níveis para cada arranjo, com espaçamento de 6m entre eles, a contar de uma cota média de 720 m das linhas de aquisição de imageamento elétrico, com a variável resistividade apresentando valores na faixa de 0,5 a 15019 $\Omega.m$. Dessa forma pode-se ter uma visualização em mapa da variação da resistividade para diferentes níveis de profundidade na área do cemitério.

6.5 Ensaio de Permeabilidade de Solo “*in situ*”

Para se quantificar a condutividade hidráulica *in situ*, vários são os métodos disponíveis, e a escolha adequada de um determinado método dependerá das características do solo e das condições do local a ser estudado (BANTON, 1993).

Neste trabalho, usou-se o método do permeâmetro Guelph, que pode ser classificado, entre outros métodos, como um dos mais rápidos no procedimento de ensaio, fácil emprego e cálculo da condutividade hidráulica, de maior exatidão, e de menor perturbação no solo (RAGAB e COOPER, 1990).

O método consiste em um permeâmetro de carga constante que trabalha sob o princípio do tubo de Mariotte, e permite determinar entre outras propriedades a condutividade hidráulica saturada, levando em consideração o efeito de fluxo não saturado. A determinação se faz através de um coeficiente da condutividade hidráulica, que comumente é obtido segundo procedimentos de ensaios e cálculos denominados de, um estágio, mantendo uma altura constante de água no furo de sondagem, e, dois estágios, onde uma segunda e maior altura de água é aplicada após a conclusão do primeiro estágio (REYNOLDS e ELRICK, 1985).

Em um dia de campo no Cemitério da Saudades e arredores fez-se o ensaio com o permeâmetro de Guelph. Assim foram escolhidos três locais, um na quadra 45 (figura 23), e dois nos arredores do cemitério, que apresentavam as melhores características para a realização do ensaio. O material utilizado é

de propriedade do Instituto de Geociências e Ciências Exatas (IGCE) da UNESP – Rio Claro.



Figura 23 : Ensaio utilizando o permeâmetro de Guelph no Cemitério da Saudade.

7 RESULTADOS E INTERPRETAÇÃO

7.1 Ensaio com permeâmetro de Guelph

Os três ensaios resultaram em valores de coeficientes próximos, no entanto foi escolhido um para ser usado como referência neste trabalho. Pois este foi o único executado dentro dos limites do cemitério (na quadra 45) e cujo terreno apresentava as melhores condições para o ensaio.

O coeficiente de condutividade hidráulica obtido foi de 0,0007 cm/s. Segundo a tabela de valores típicos de condutividade hidráulica para alguns tipos de solo, proposta por Ortigão (1995), o solo em questão possui alta permeabilidade e é classificado como arenoso. Ou seja, é um solo que permite uma alta condutividade hidráulica.

Permeabilidade	Tipo de Solo	K cm/s
Solos permeáveis		
Alta	Pedregulhos	$>10^{-3}$
Alta	Areias	10^{-3} a 10^{-5}
Baixa	Siltes e argilas	10^{-5} a 10^{-7}
Solos impermeáveis		
Muito baixa	Argila	10^{-7} a 10^{-9}
Baixíssima	Argila	$<10^{-9}$

Tabela 04: Tabela de valores típicos de condutividade hidráulica, Ortigão (1995)

É possível fazer um cálculo simples utilizando esse coeficiente encontrado, para estimar-se uma distância de deslocamento da água subterrânea em um intervalo de tempo, visto o coeficiente ser dado em centímetros por segundo. Assim tomando a medida de tempo de 1 ano, tem-se que o deslocamento da água subterrânea é estimado em 217 m. Essa estimativa nos dá uma base da velocidade que a água subterrânea pode disseminar um possível contaminante (necrochorume nesse caso) no subsolo da área de estudo.

7.2 Mapa de Sepultamentos

O mapa de sepultamentos (Figura 24) ilustra quais foram as quadras onde foram realizados os maiores números de sepultamentos nos últimos 5 anos que antecedem o ensaio geofísico realizado. Como mostra a legenda quanto maior o raio da circunferência maior o número de sepultamentos.

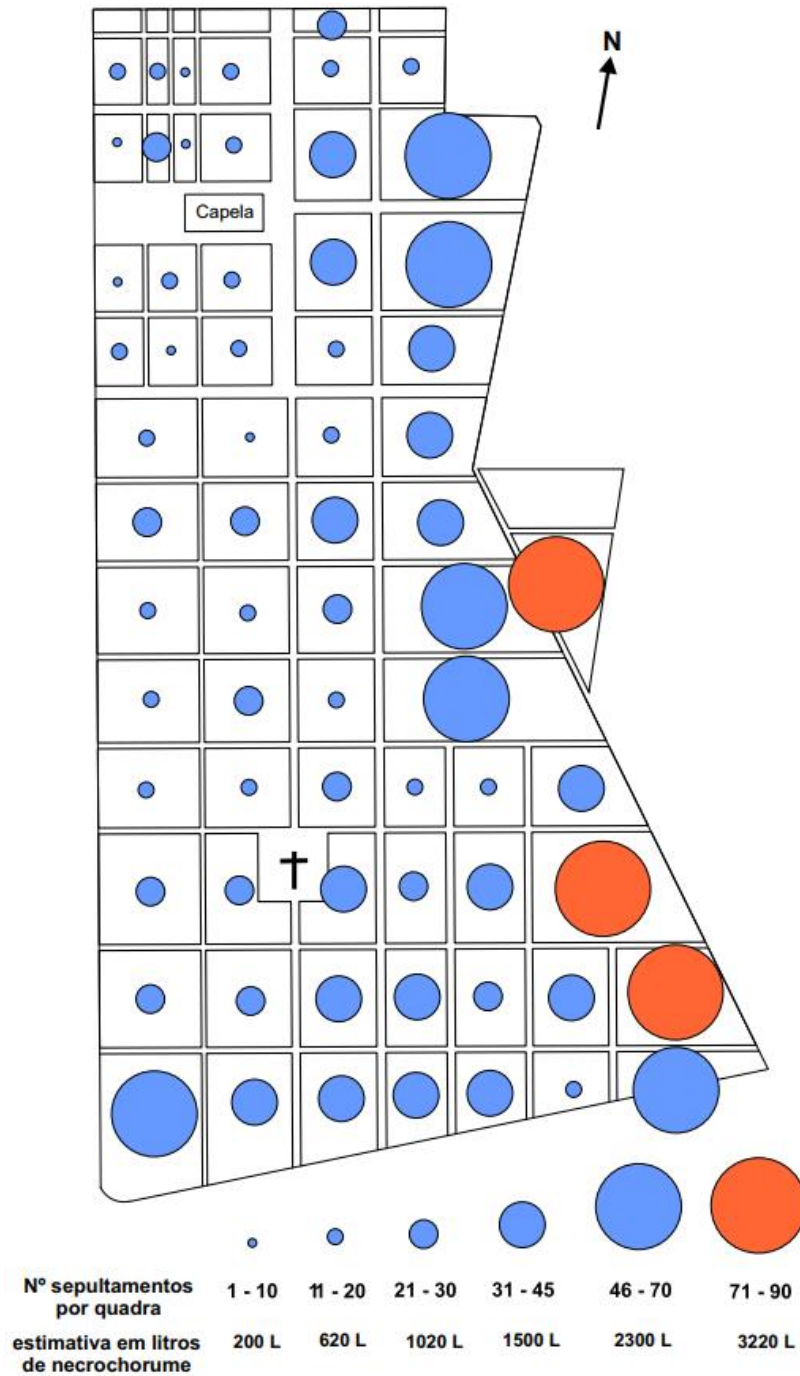


Figura 24: Mapa com número de sepultamentos por quadra nos 5 anos anteriores ao ensaio de imageamento elétrico.

A legenda mostra também o equivalente quantitativo em volume (litros) de necrochorume produzido, com base na relação entre massa corpórea e produção de necrochorume definida por Silva (1995).

7.3 Sondagens Elétricas Verticais e Mapa Potenciométrico

A localização das SEV's é indicada na figura abaixo. A interpretação quantitativa das curvas das 3 SEV's executadas, com relação a zona saturada, são bem semelhantes, indicando um valor bem próximo de 10 m para o início desta. Como dito anteriormente esse dado foi utilizado para a geração do mapa potenciométrico no programa *Surfer*, o qual está apresentado na Figura 25.



Figura 25: Mapa Potenciométrico e localização das SEV's.

No mapa vê-se um sentido de fluxo subterrâneo, que é na direção de SW. As curvas ajustadas e os modelos gerados pelo processamento das SEV's estão na parte dos anexos.

7.4 Imageamento Elétrico

Os valores de resistividade aparente, foram ajustados durante o processamento em escala logarítmica única, aplicada a todas as seções, de modo a facilitar as comparações e interpretações. Assim, a escala de resistividade dos modelos de inversão variou de 0,5 $\Omega.m$ a 15.019 $\Omega.m$, que devem ser entendidas como aparente.

As 3 seções de referência, que indicam a resposta do meio físico não alterado, apresentam-se razoavelmente homogêneas, nota-se esse fato facilmente pelo predomínio de apenas duas cores nas seções (Figura 26). Elas estão localizadas a jusante do fluxo de água subterrânea e a 70m de distância da área do cemitério, e servem, como base de comparação do meio físico não alterado com a área do cemitério. Os valores presentes de resistividade variam entre 41 a 1500 $\Omega.m$.

Levando-se em consideração as seções de referência, e comparando seus valores de resistividade com os das seções do cemitério, é possível inferir uma faixa de valores representativa do meio físico alterado, possivelmente pela influência do necrochorume. Como o valor mínimo nas seções de referência é de 41.5 $\Omega.m$, infere-se que valores abaixo desse sejam representativos do meio físico alterado, ou seja, na faixa entre 0.5 a 41.5 $\Omega.m$. Como destaca o retângulo vermelho na legendas dos valores de resistividade.

Neste trabalho, as porções das seções que concentram valores nessa faixa de baixa resistividade (cores frias), e representam possíveis alterações do meio físico, serão denominadas de zonas de baixa resistividade – “ZBR”, para simplificar a escrita. Da mesma forma também será abreviado o nome do arranjo “dipolo-dipolo” por “D-D”

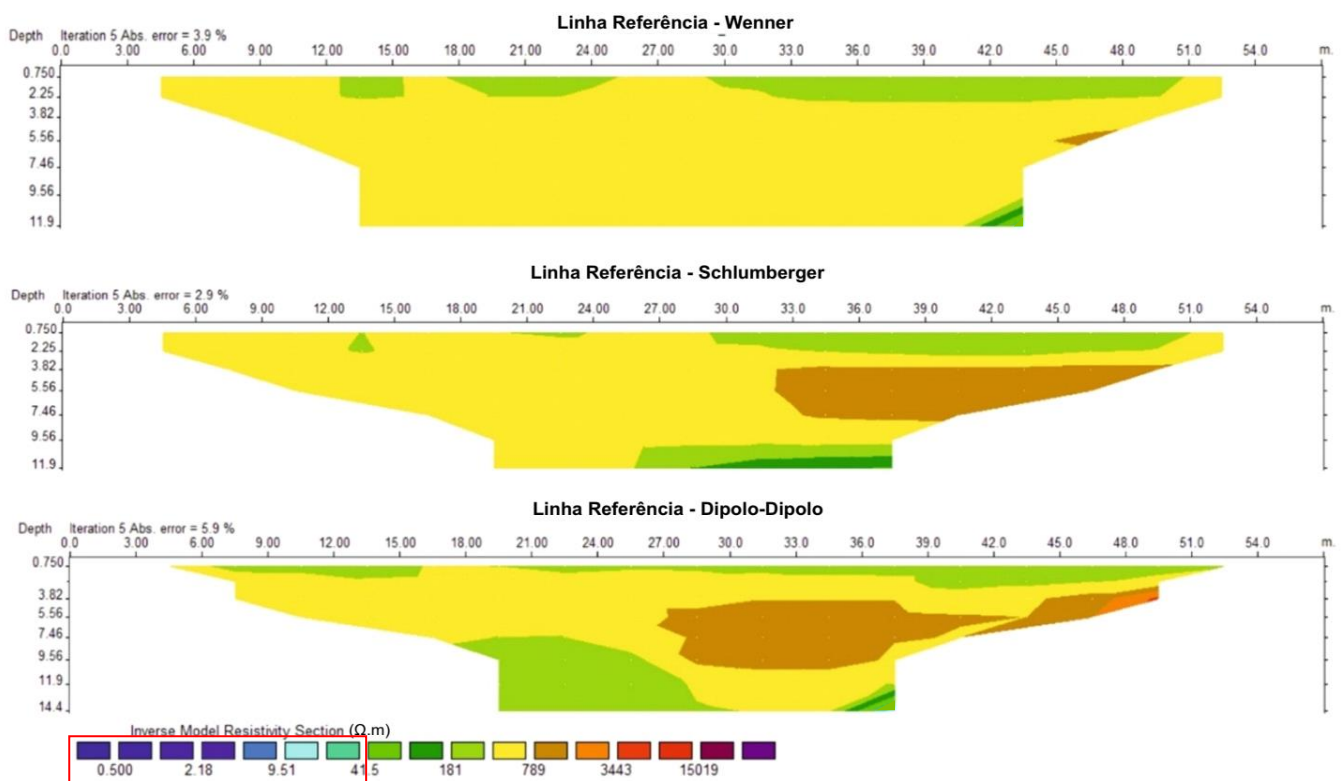


Figura 26: Seções de IE das linhas de referência.

Começando pela parte sul do cemitério (fundos), as seções geelétricas das linhas IE 01, para os três tipos de arranjo, apresentaram grandes zonas de baixa resistividade de 1,0 a 20 $\Omega.m$, na porção entre 90 e 140m aproximadamente. Nas demais partes dessas seções predominam valores de resistividade próximos ou acima aos das seções de referência, indicando possivelmente o meio físico não alterado. Nota-se como topo e base dessa ZBR estão bem definidos no arranjo D-D, principalmente a base, marcada em 10m de profundidade aproximadamente. Já nos outros dois arranjos os limites são difusos, se expandindo até a profundidade máxima da seção como mostra a Figura 27.

No arranjo D-D ainda há mais uma zona de baixa resistividade, localizada entre os 100 e 120 m de seção, e a uma profundidade de 14 a 25 m. Os outros dois arranjos também apresentam, na faixa dos 100 m, outras zonas de baixa resistividade que são destacadas na Figura 27, porém de menor expressão. Nota-se que as seções IE-01 para os arranjos Wenner e Schlumberger são extremamente semelhantes. Além de possuírem também uma zona de alta resistividade com localização e formato quase idênticas, assim como as porções restantes das seções.

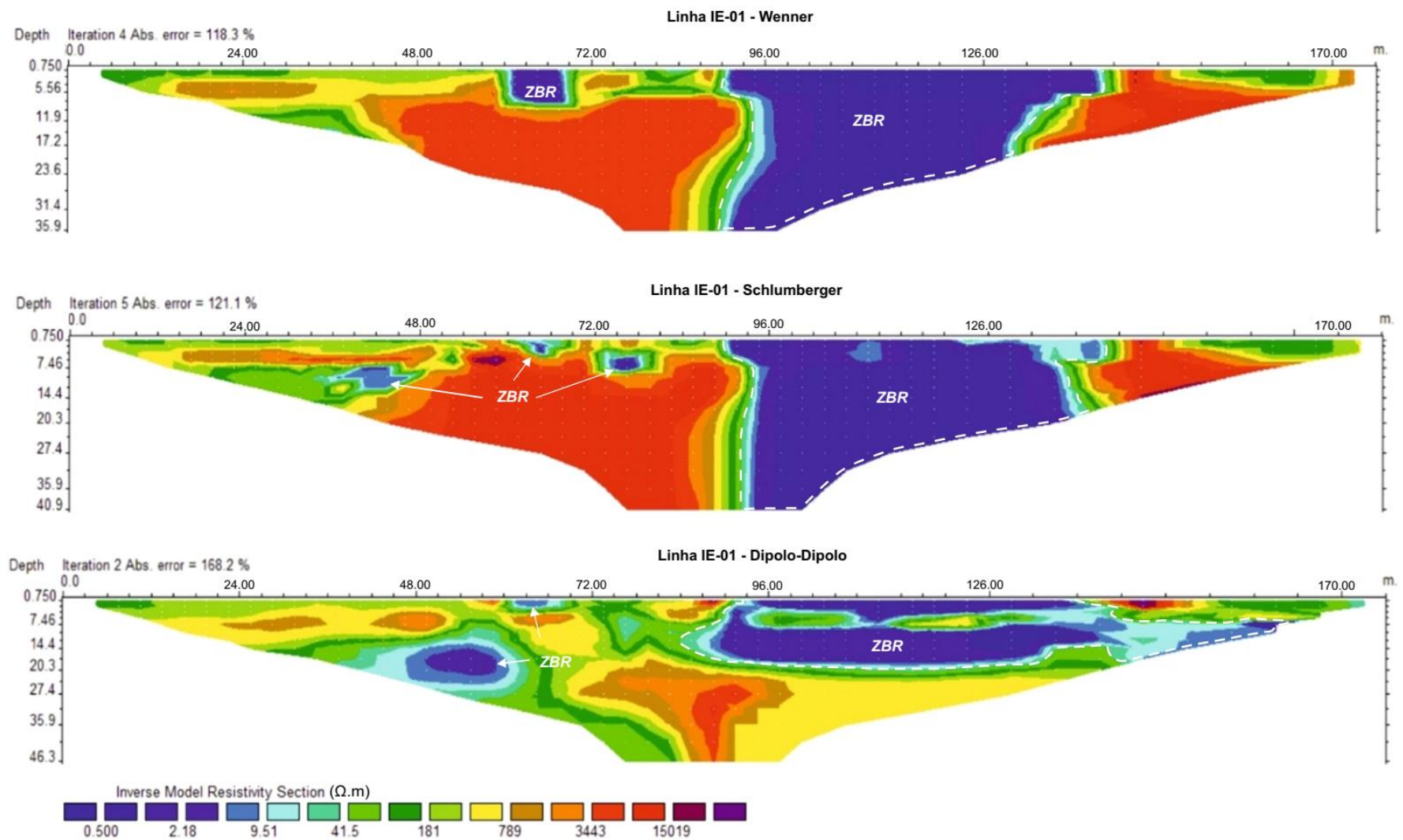


Figura 27: Linhas de imageamento elétrico IE-01.

Ainda na porção sul do cemitério, as linhas de IE-02 e 03, também se apresentam com extrema semelhança entre os arranjos Wenner e Schlumberger, e apenas um pouco menos para o arranjo D-D. As seções de IE-02 apresentam grandes ZBR de dimensões e formas comuns aos três tipos de arranjos: Elas se estendem no perfil aproximadamente entre os 80m a 150m, começam a uma profundidade de 15m e persistem até a profundidade máxima de suas respectivas seções, como mostra a Figura 28. Com relação a resistividade, essas ZBR apresentam valores variando de 4,0 Ω .m a 20 Ω .m para as seções dos arranjos Schlumberger e D-D, já no arranjo Wenner de 1 Ω .m a 20 Ω .m. Assim como nas seções de IE-01, as de IE-02 também apresentam ZBR de menor expressão localizadas nas primeiras dezenas de metros da seção e próximas a superfície. Na figura elas são indicadas pelas setas.

Em IE-03 as seções dos arranjos Wenner e Schlumberger se assemelham mais em termos de valores de resistividade das grandes ZBR, predominando amplamente a variação de 20 Ω .m a 40 Ω .m. porém, podendo chegar até 4 Ω .m em uma pequena porção da seção de arranjo Schlumberger, como mostra a seta da Figura 29, que indica essa pequena porção. Já para a seção de IE-03 D-D a ZBR possui variação de 1 Ω .m a 40 Ω .m.

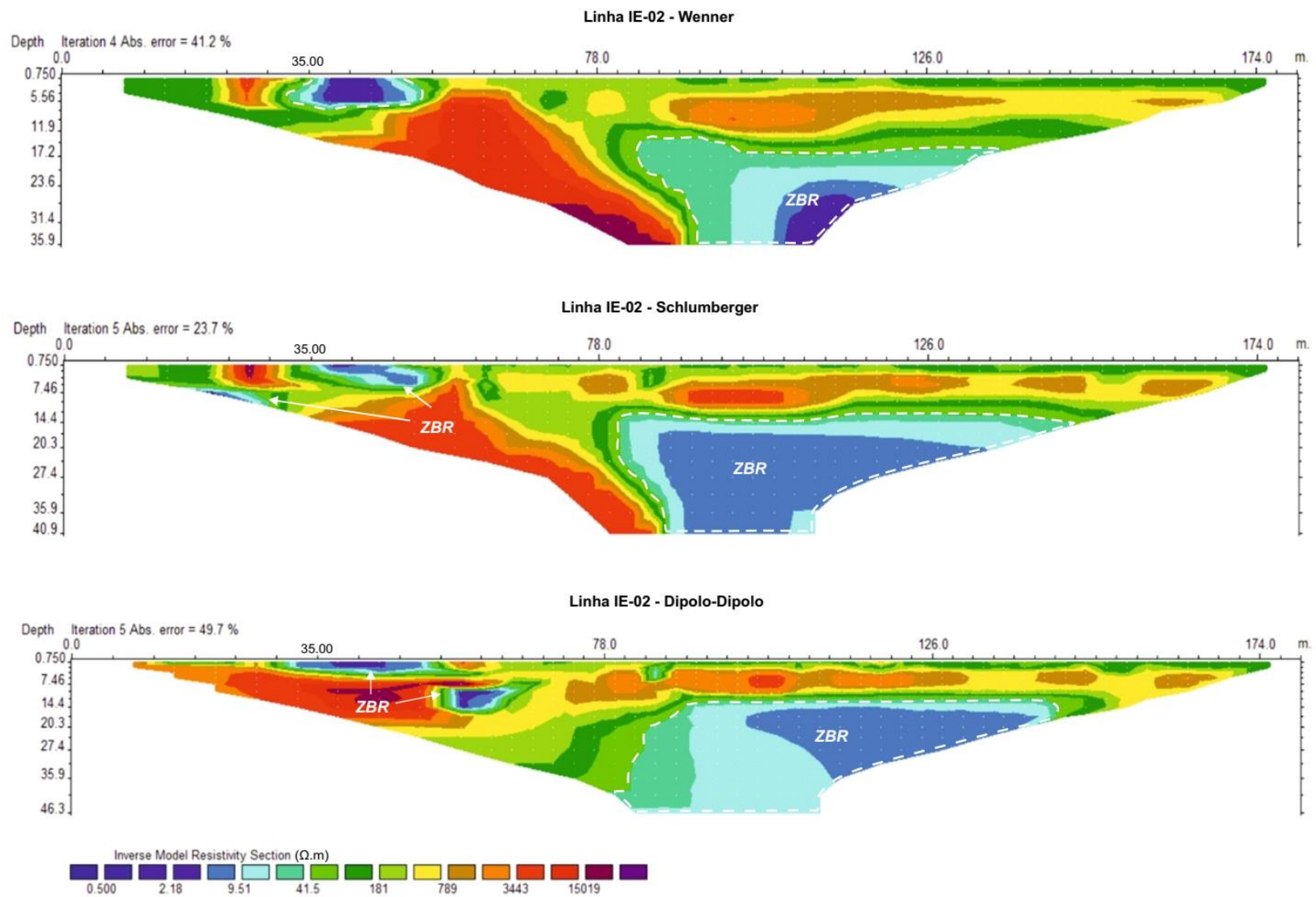


Figura 28: Linhas de imageamento elétrico IE-02.

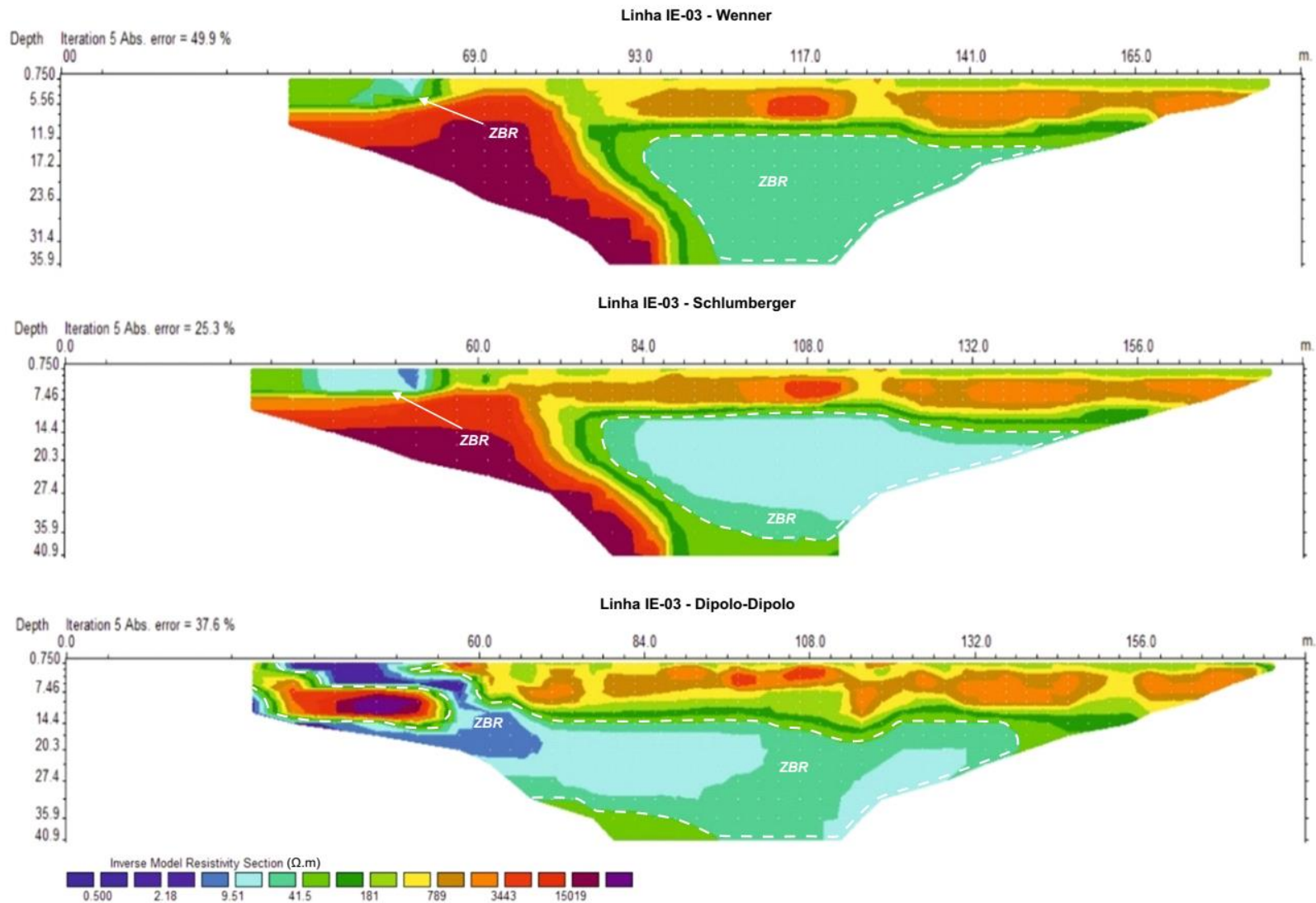


Figura 29: Linhas de imageamento elétrico IE-03.

Aproximando-se da porção central do cemitério, as linhas IE-04 apresentam pequenas ZBR's, de áreas bem menores que as linhas de números anteriores, como mostra a Figura 30. Suas formas e posições na seção são praticamente iguais para os três tipos de arranjos. E estão todas localizadas rentes a superfície, com seus topos na superfície, e as bases em sua maioria atingindo uma profundidade máxima de 7 m aproximadamente para o arranjo D-D, e 12 m para os outros dois.

Com relação a resistividade dessas ZBR's no arranjo Wenner predomina o valor de 1 Ω .m, e nos arranjos de D-D e Schlumberger de 4 Ω .m. Já, com relação aos valores de alta resistividade, acima de 3440 Ω .m, as seções dos arranjos Wenner e D-D apresentam grandes áreas para esses valores, cerca de metade da área total das seções. No arranjo Wenner acontece o contrário, há apenas pequenas porções com valores de resistividade superiores a 3440 Ω .m.

As linhas IE-05 para os arranjos Wenner e Schlumberger, são extremamente semelhantes. Suas ZBR's apresentam formas, localização e valores de resistividade muito parecidos (Figura 31). Elas estão localizadas rente a superfície, com profundidade aproximada de 7,5 m, com exceção de uma pequena porção da ZBR no início (0 m) da linha de arranjo Schlumberger, que atinge 12 m de profundidade. Com relação aos valores de resistividade das ZBR's há uma variação entre 1 Ω .m a 20 Ω .m, com as linhas de arranjo Wenner predominando o valor de 1 Ω .m, e a de Schlumberger 4 Ω .m.

Para o arranjo D-D repete-se a descrição acima dos dois outros arranjos, com valor predominante de resistividade nas ZBR's de 4 Ω .m, assim como o arranjo Schlumberger. A diferença é que o arranjo D-D possui uma ZBR a mais, e de dimensões consideravelmente maiores como mostra a Figura 31. Essa ZBR ao contrário das outras de IE-05, está localizada com o topo abaixo dos 7,5 m de profundidade na seção, persistindo até a profundidade máxima da seção (20,3 m), como mostra a Figura 31.

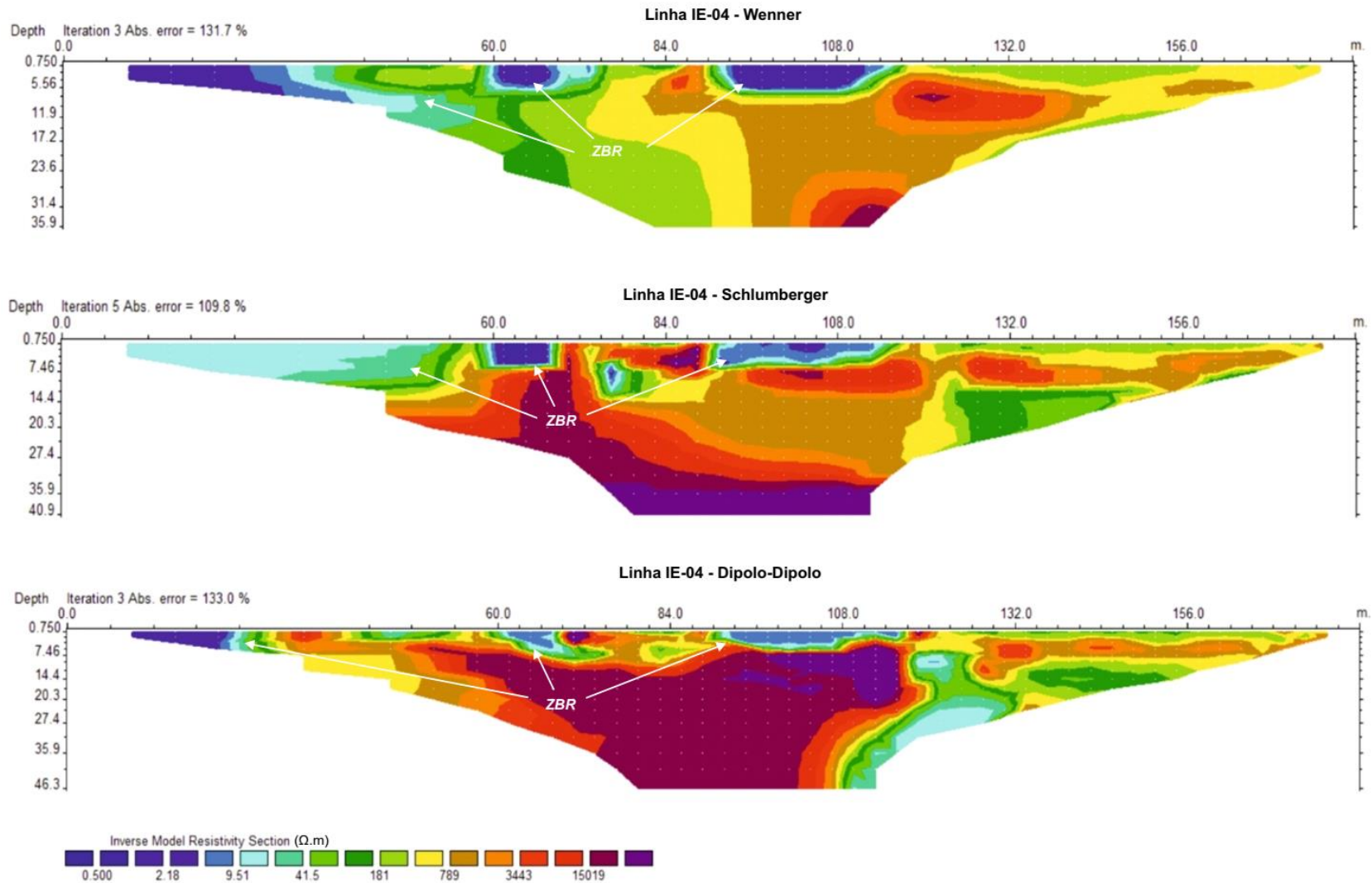


Figura 30: Linhas de imageamento elétrico IE-04.

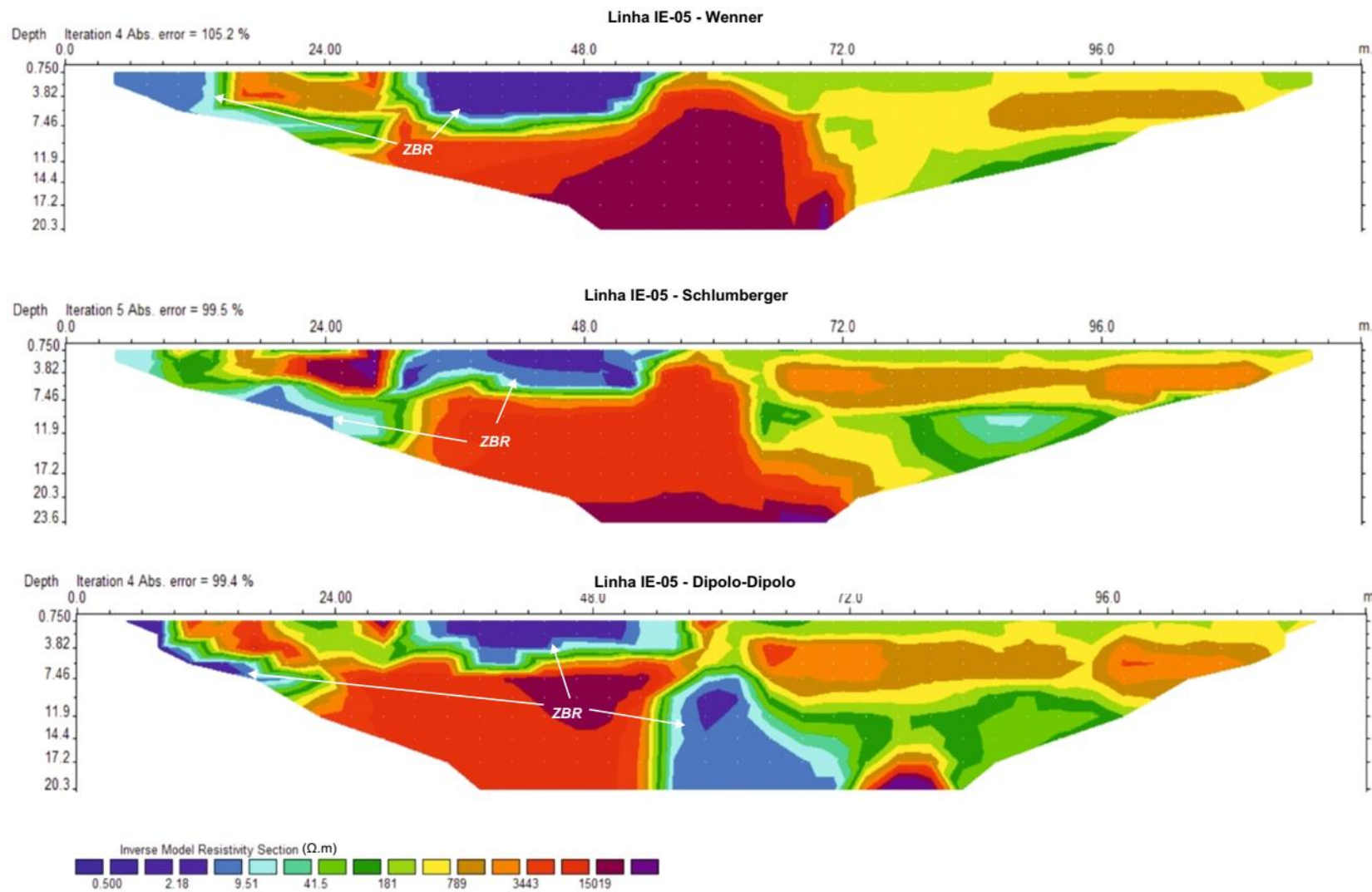


Figura 31: Linhas de imageamento elétrico IE-05.

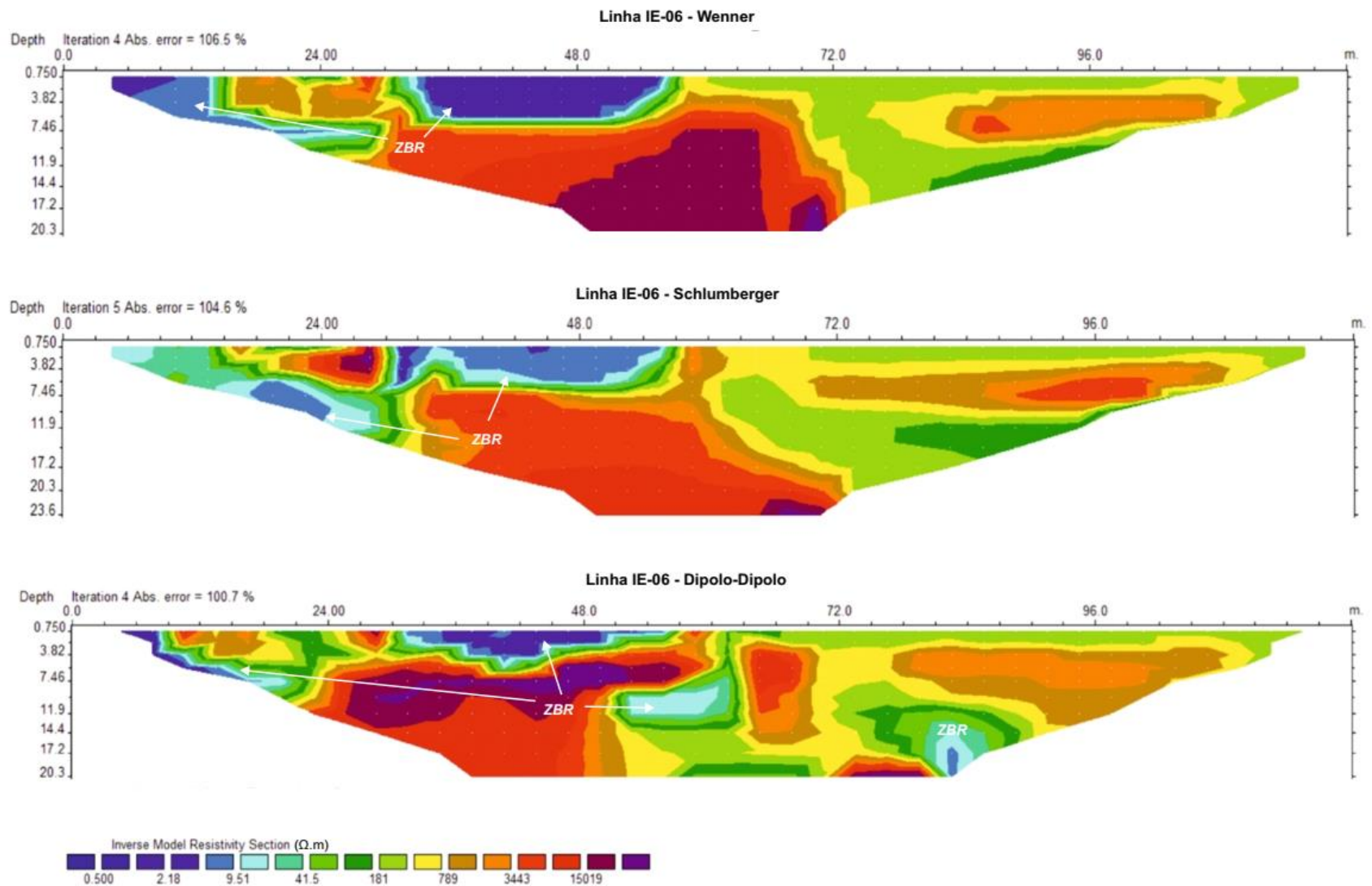


Figura 32: Linhas de imageamento elétrico IE-06.

As seções das linhas de IE-06 para os arranjos Wenner e Schlumberger são praticamente iguais as das linhas de IE-05, em termos dos aspectos descritos aqui. Podendo-se assim, manter a mesma descrição acima para ambas as linhas desses dois arranjos.

A seção de IE-06 para o arranjo D-D também é semelhante a da linha IE-05, possuindo duas ZBR's rentes a superfície com localização e valores de resistividade quase idênticas as da linhas IE-05. A diferença está na porção centro-leste da seção, onde há duas pequenas ZBR's, como mostra a Figura 32. Uma localizada bem no centro da seção com valor de resistividade predominante de 10 Ω .m, e a outra mais a mais a leste nos 85 m do perfil, iniciando-se a 13m de profundidade e persistindo até a profundidade máxima da seção.

Para as seções da linha IE-07, observa-se uma ZBR de grandes dimensões comum aos três arranjos. Ela situa-se na borda leste da seção, estendendo-se dos 90 m aproximadamente até o final da seção em 117 m. Com profundidade de 7,5 m para os arranjos Wenner e Schlumberger, e 14,5 m para o arranjo D-D. Tendo assim esta ZBR uma área maior para o arranjo D-D, porém em questão de localização, formas e valores de resistividade não há diferenças consideráveis entre os arranjos, com valor de resistividade predominante de 1 Ω .m.

Também muito semelhante entre os arranjos, há ainda outra ZBR de dimensões mais modestas, localizada rente à superfície na parte central da seção (Figura 33). Com profundidade de 3,5 m para os arranjos Schlumberger e D-D, e 5,5 m para Wenner. Para os arranjos Schlumberger e D-D há ainda mais uma ZBR significativa presente nas seções, ausente em Wenner, como pode-se observar na Figura 33. O que é uma exceção para o padrão observado nas seções até a linha de IE-06, onde as seções para Schlumberger e Wenner estavam sendo quase idênticas (tendo em vista os aspectos aqui descritos), e D-D com algumas poucas diferenças destas duas.

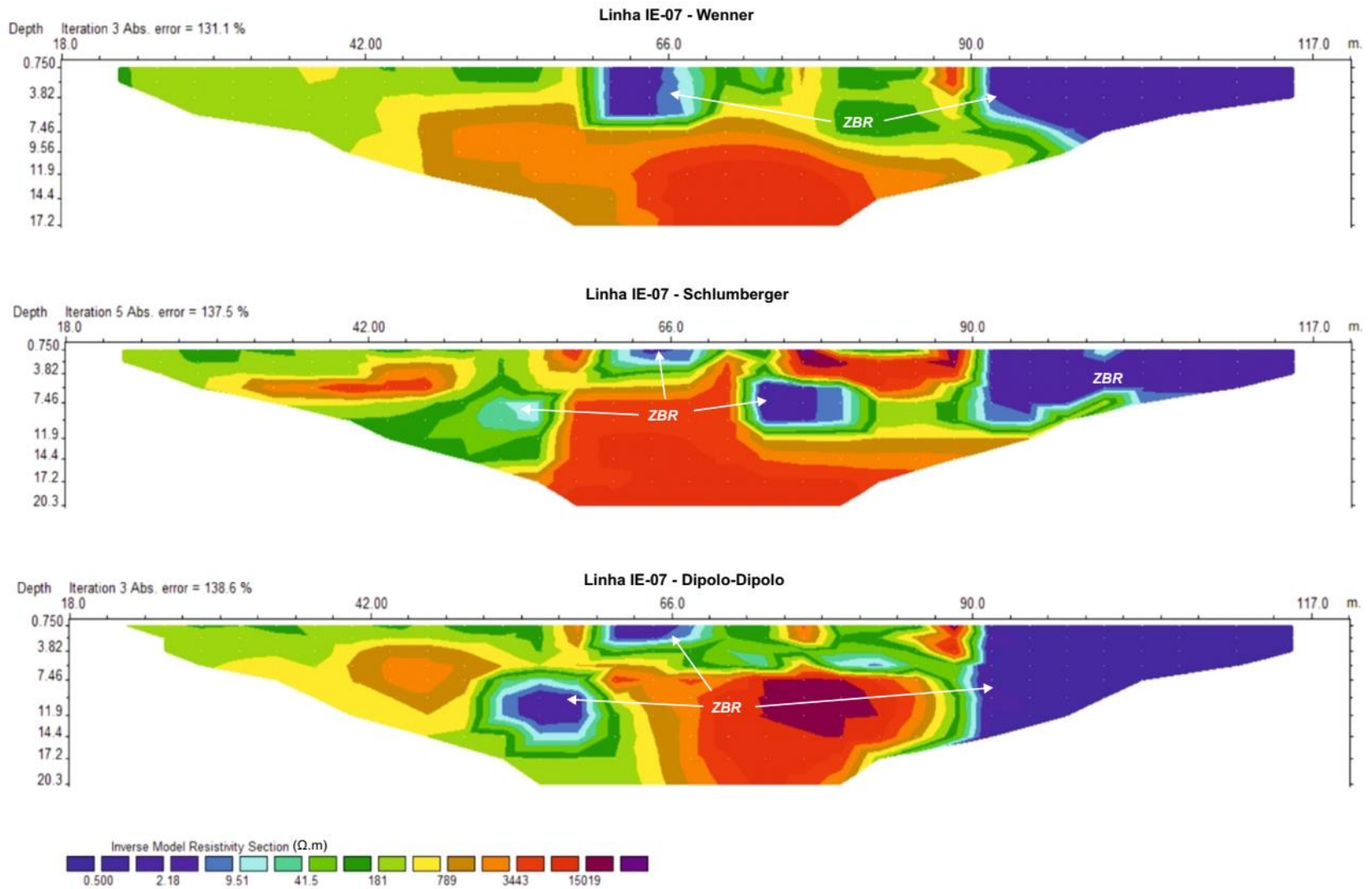


Figura 33: Linhas de imageamento elétrico IE-07.

Nas seções de IE-08 nota-se um aspecto acamado na variação dos valores de resistividade, ou seja, os valores se distribuem em camadas horizontais mais ou menos regulares, tendo assim os seus topos bem demarcados. Para o arranjo Wenner há apenas uma porção ínfima com valor de resistividade considerado como ZBR, localizada na parte mais profunda da seção, parecendo um filete, como mostra a Figura 34. Para os arranjos Schlumberger e D-D, suas ZBR também estão localizadas nas porções mais profundas das seções em forma aproximada de camadas.

A ZBR do arranjo Schlumberger tem seu topo em 17 m de profundidade, delongando-se até o fundo da seção até os 23,6 m. Já a ZBR de D-D tem topo menos profundo em 14,5 m aproximadamente, indo até o fundo da seção em 20,3 m (menos profunda que a ZBR de Schlumberger), conferindo assim uma espessura quase igual para as duas ZBR's.

Em questão de valores de resistividade, nos arranjos Wenner e Schlumberger predominam o valor de 20 Ω .m, enquanto no D-D a ZBR em forma de camada é bem dividida entre três camadas menores, representando os valores de 4, 10 e 20 Ω .m, do topo para a base. Sendo o arranjo com a ZBR de menor resistividade.

As seções de IE-09 se assemelham consideravelmente com as de IE-08, apresentando aspecto um tanto acamado também, porém menos regular do que em IE-08. Os valores de resistividade também são muito parecidos entre IE-08 e 09.

As seções de IE-09 para os arranjos Wenner e Schlumberger são extremamente semelhantes, com suas ZBR's apresentando mesma localização, formas e valores predominantes de resistividade. Elas possuem topo na profundidade de 12 m aproximadamente delongando-se até a profundidade máxima da sessão, com valores de resistividade variando de 4 Ω .m a 20 Ω .m, predominando o valor de 20 Ω .m.

Já para o arranjo D-D, sua ZBR apresenta topo menos profundo em aproximadamente 9,5 m, também delongando-se até a profundidade máxima de seção. Possui maior variedade de resistividade que os outros dois arranjos, entre 2 Ω .m a 20 Ω .m, com predominância de 10 Ω .m, ou seja, é a ZBR menos resistiva dentre os arranjos nessa linha de IE-09.

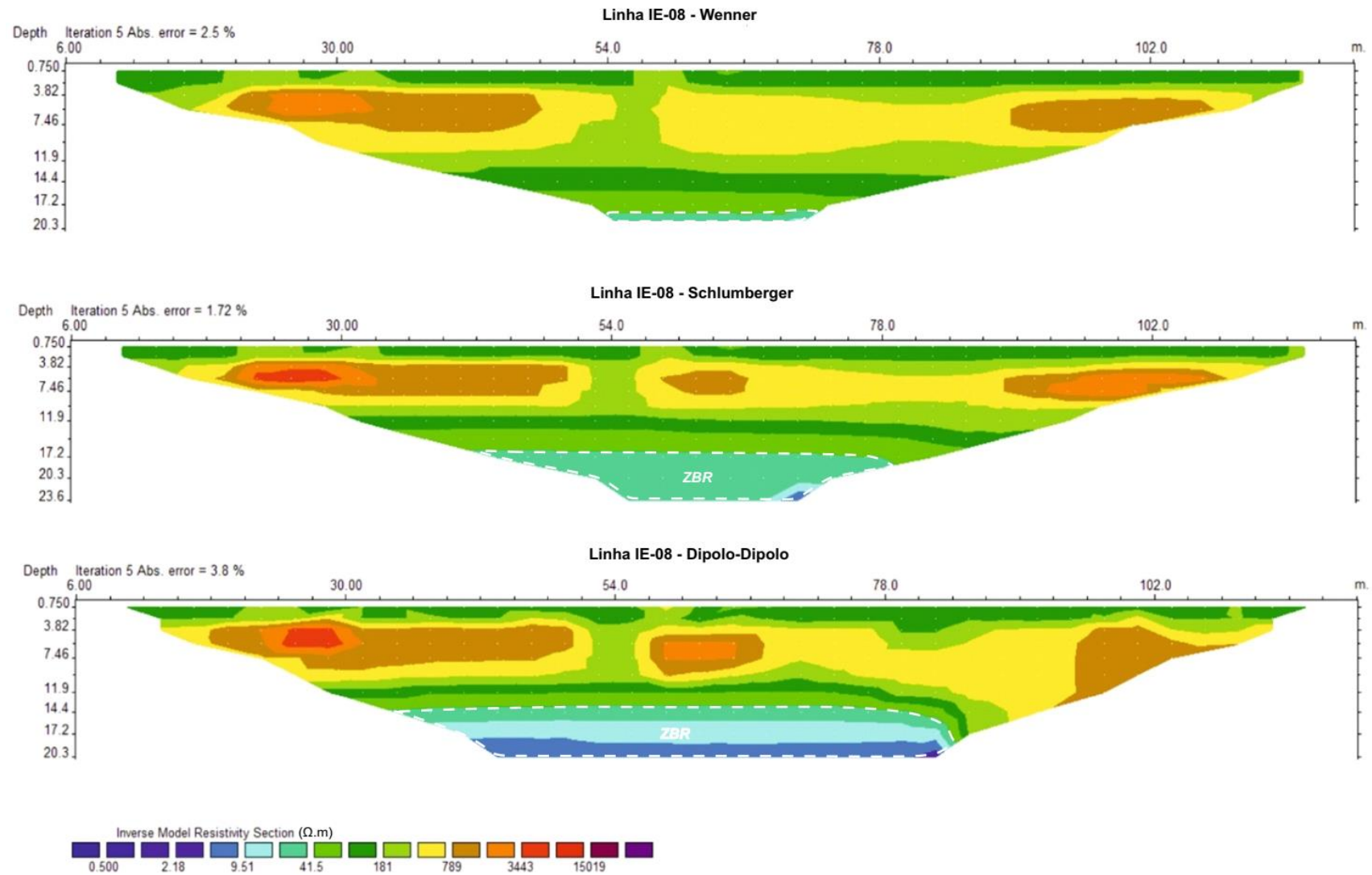


Figura 34: Linhas de imageamento elétrico IE-08

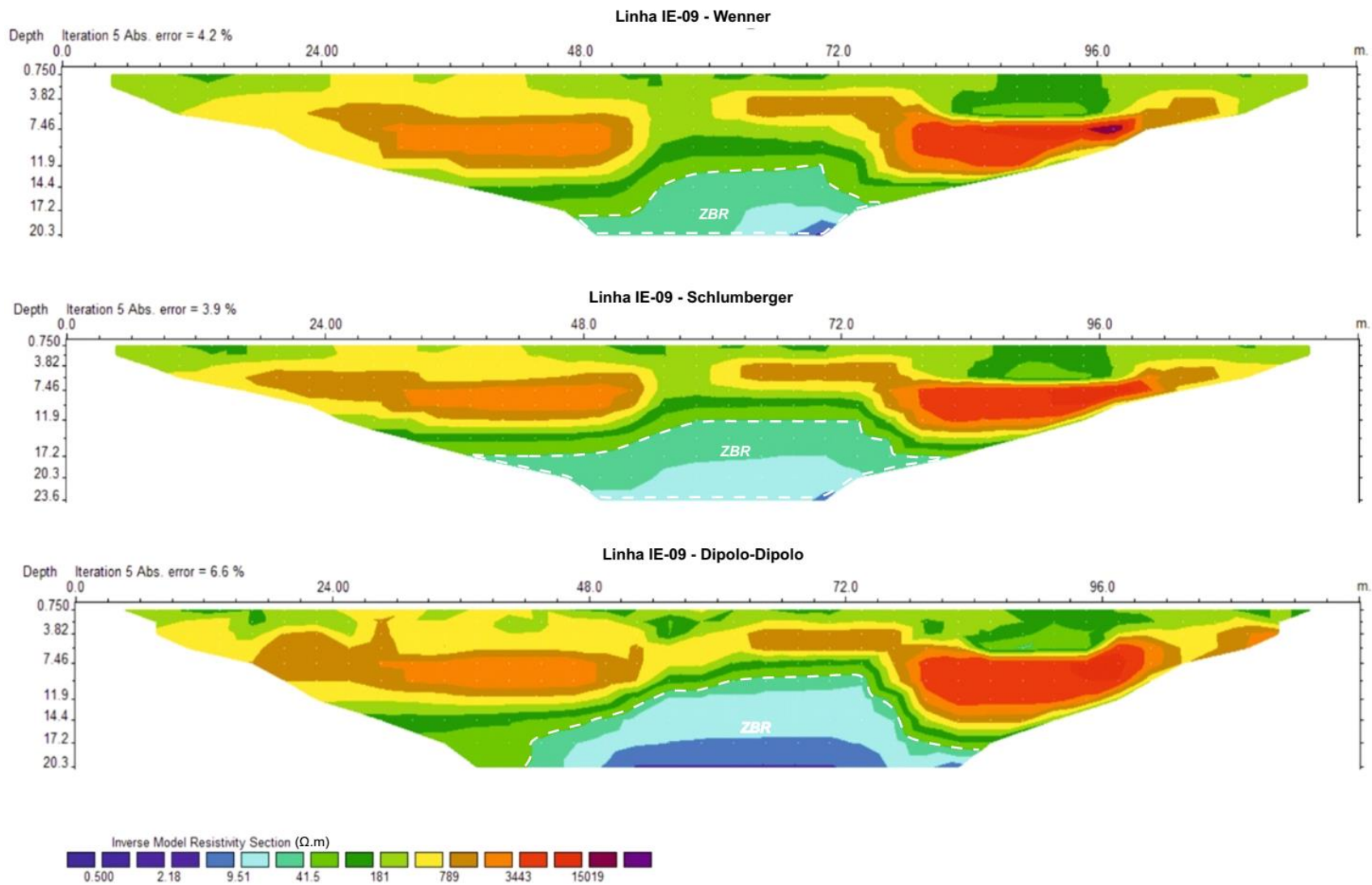


Figura 35: Linhas de imageamento elétrico IE-09

Nas seções de IE-10, para os arranjos Wenner e Schlumberger, nota-se o padrão encontrado nas seções de IE-04 a IE-06, com as ZBR' localizadas superficialmente e na parte oeste de seção. Suas ZBR's são próximas da superfície, com base atingindo os 5 m de profundidade aproximadamente, como mostra a Figura 36. Com relação aos valores de resistividade para o arranjo Schlumberger predomina amplamente o valor de 10 Ω .m, já para Wenner há uma variação de 4 a 20 Ω .m, com predominância do valor de 4 Ω .m.

O arranjo D-D para esta IE-10, possui duas ZBR's bem semelhantes as descritas anteriormente, porém menos espessas e resistivas (Figura 36), com valor predominante de resistividade de 2 Ω .m. E ainda possui mais duas ZBR's não presentes nos outros dois arranjos. Uma delas está no centro da seção, com topo em 7,5 m aproximadamente, e persistindo até o fundo da seção. A outra de dimensões mais modestas, encontra-se na parte mais a leste da seção, em profundidade aproximada de 15 m. As ZBR's de D-D são as menos resistivas em IE-10, com uma variação de 2 Ω .m a 10 Ω .m, sendo esta faixa de valores bem distribuída nas áreas das ZBR's.

Próximo à entrada principal do cemitério foi feita a última linha, IE 11. Suas seções para o arranjo Wenner e Schlumberger apresentam duas ZBR's quase interligadas na porção oeste da seção. Elas são rentes a superfície, com suas bases atingindo uma profundidade de 7,5 m aproximadamente. Seus valores de resistividade variam de 2 Ω .m a 20 Ω .m, sendo os valores menores predominantes para o arranjo Wenner, e para Schlumberger há maior predominância do valor de 20 Ω .m. No arranjo Schlumberger há ainda uma pequena ZBR na porção leste de seção, um pouco mais profunda que as outras descritas (Figura 37), com valor predominante de 10 Ω .m.

O arranjo D-D também apresenta duas ZBR's como as descritas anteriormente nos outros dois arranjos, porém as de D-D são menos espessas, e também menos resistivas, com valor de resistividade predominante de 1 Ω .m.

Há ainda mais duas ZBR's em D-D que não estão presentes nos outros dois arranjos (mesmo caso de IE-10). Uma no centro e fundo da seção, com topo em 5 m aproximadamente, persistindo até a profundidade máxima da seção, com valor predominante de 2 Ω .m. A outra está mais a leste e em profundidade parecida, porém bem mais resistiva, com valor predominante de 20 Ω .m.

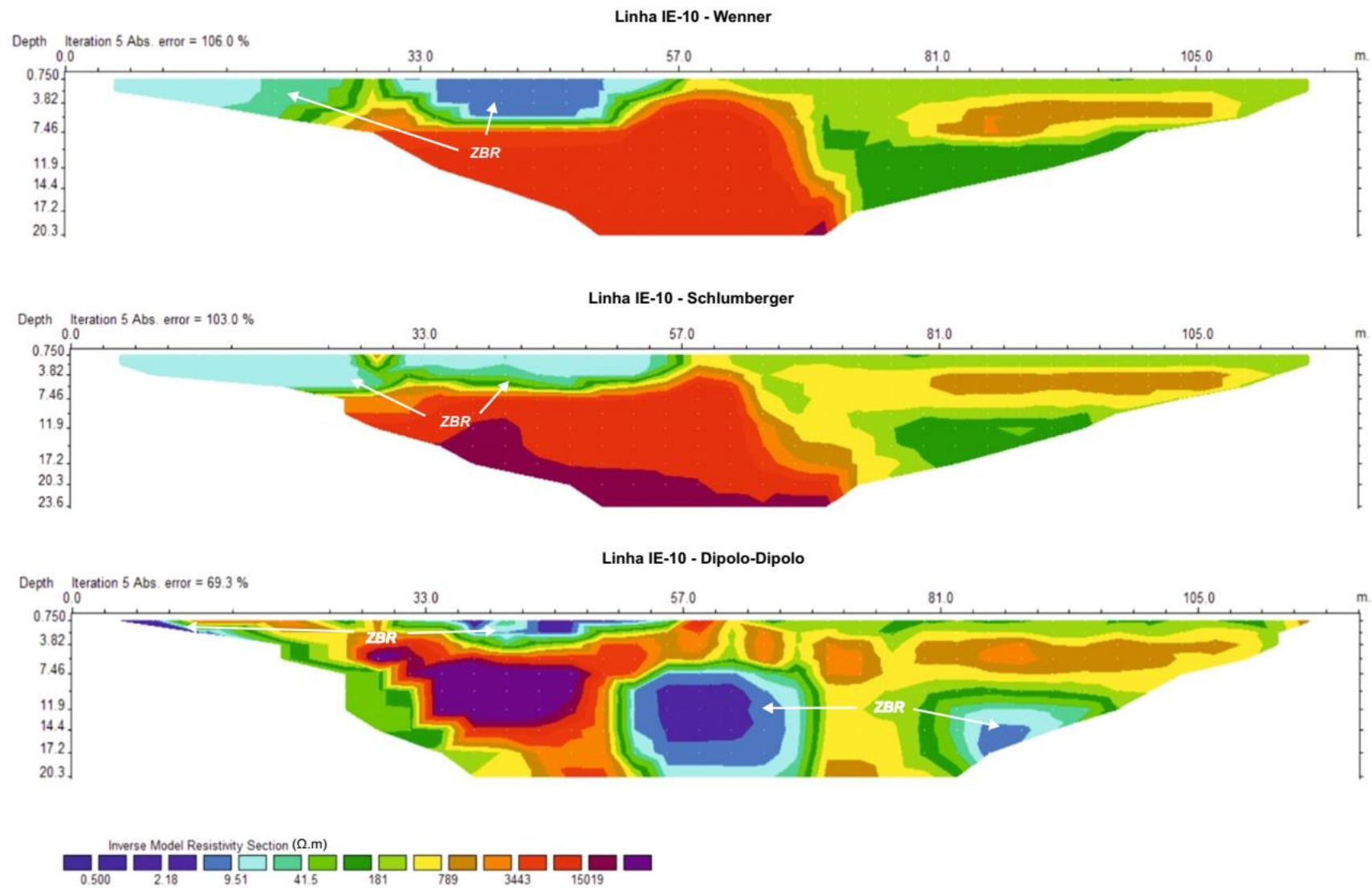


Figura 36: Linhas de imageamento elétrico IE-10

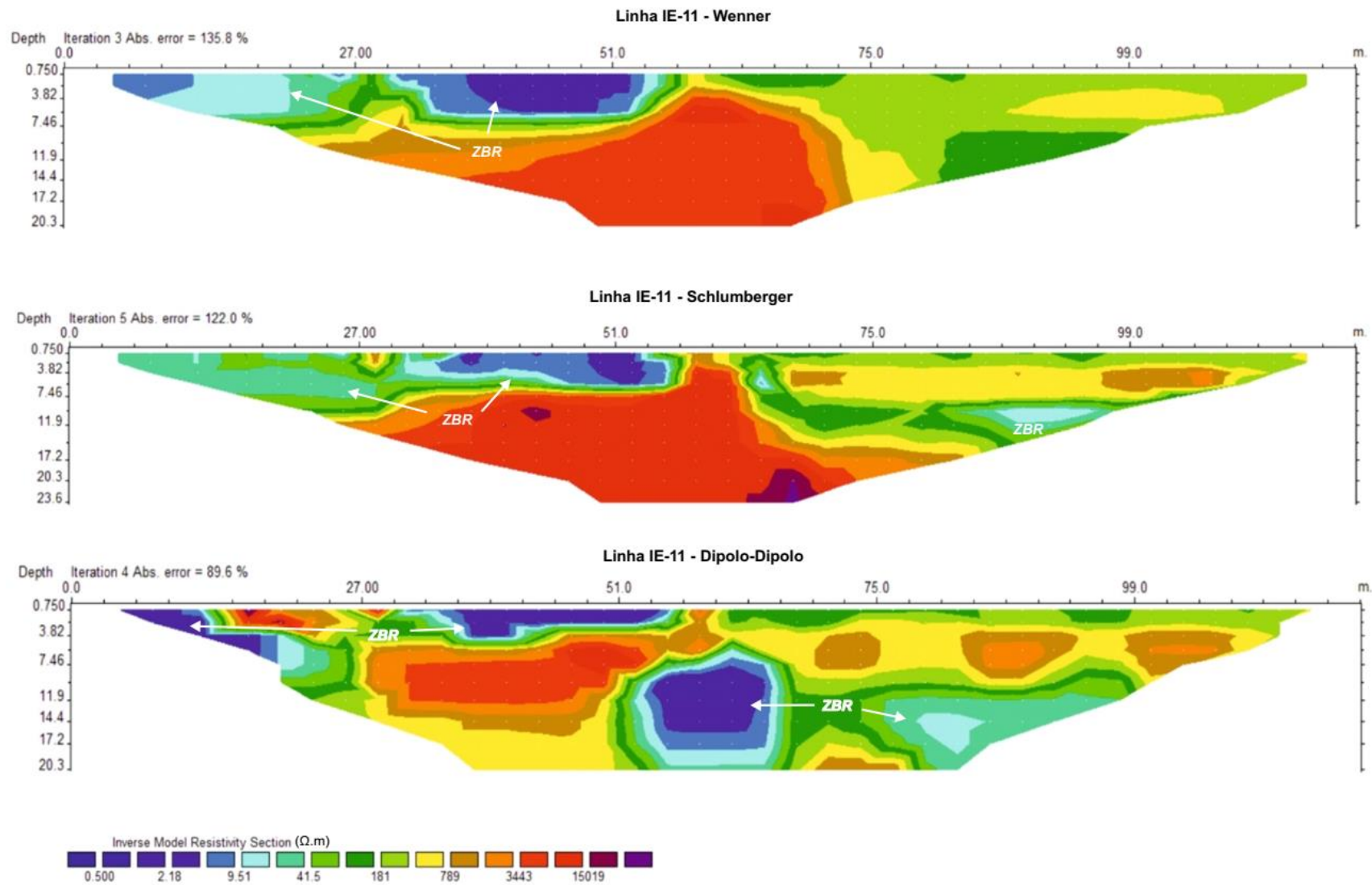


Figura 37: Linhas de imageamento elétrico IE-11

7.5 Comparações entre arranjos das seções e mapas multiníveis

Com base nas descrições do item anterior será feito aqui um resumo, porém, com ênfase nas diferenças das ZBR's entre os arranjos. Para auxiliar na visualização dessas descrições utilizar-se-á a Figura 38, composta de alguns dos mapas multiníveis citados no ítem 6.4. Ressalta-se que os valores dos níveis de profundidade dos mapas multiníveis são uma aproximação da profundidade real, pois o método da eletrorresistividade não mede esse parâmetro com exatidão, como relatado no ítem 5.5.

Para compor a Figura 38 foram escolhidos três mapas de diferentes níveis do arranjo D-D, visto os mapas resultantes desse arranjo marcarem as ZBR's dos outros dois, Wenner e Schlumberger. E um mapa do arranjo Schlumberger (que também representa o arranjo Wenner, pois são extremamente semelhantes), para servir de comparação com seu respectivo mapa de nível do arranjo D-D.

Das seções de IE-01 a 06 nota-se que as do arranjo Wenner são as que apresentam maior predominância dos valores mais baixos de resistividade nas áreas de suas ZBR's em relação aos outros dois arranjos, com exceção da seção IE-03. Já para a sequência de IE-07 a última IE-11, é o arranjo D-D que apresenta maior predominância dos valores mais baixos de resistividade em suas ZBR's.

Em questão de dimensões, formas e localização das ZBR's, os três arranjos se encontram bem parecidos, com algumas exceções para o arranjo D-D, como na seção IE-01, onde o topo e base da ZBR está bem marcado, enquanto para os outros arranjos a base se estende até a profundidade máxima da seção (Figura 27). E na seção IE-05, onde há uma ZBR de dimensões consideráveis, que não é marcada nas seções dos outros dois arranjos (Figura 31).

Nas seções de IE-04 e 06 o arranjo D-D também marca ZBR's não presentes nos outros arranjos, localizadas em profundidade a leste. Fato esse ilustrado na Figura 38, pela qual comparando os mapas D-D 7º nível e Schlumberger 7º nível, vê-se que as linhas de IE-04 a 06 para o arranjo D-D cruzam zonas de baixa resistividade (cor verde) em suas porções leste, o que não acontece no mapa do arranjo Schlumberger. Neste mapa as linhas IE-04 e 06 cruzam apenas zonas de altas resistividades. Para Wenner e Schlumberger essas linhas marcam ZBR's apenas próximas a superfície, como se vê no mapa D-D 1º nível, o qual representa igualmente os arranjos Wenner e Schlumberger para este caso.

Em IE-10 e 11 o arranjo D-D também apresenta ZBR's não presentes nos outros arranjos, de dimensões consideráveis, localizadas no centro e em profundidade das seções. Os arranjos Wernner e Schlumberger marcam ZBR's apenas rentes a superfície nessas duas linhas. Novamente a Figura 38 ilustra bem o caso, comparando os mapas do 7º nível D-D e 7º nível Schlumberger vê-se que as linhas IE-10 e 11 cruzam zonas de baixa resistividade somente no mapa de D-D, já no mapa de Schlumberger essas linhas cruzam zonas de alta resistividade.

Em sumo, as seções do arranjo D-D apresentam algumas ZBR's em profundidade, que não se fazem presentes nos outros dois arranjos. No entanto deve-se levar em conta a baixa razão sinal/ruído que este arranjo apresenta com o aumento da profundidade investigada. Assim as ZBR's em profundidade presentes nas seções de 4 a 6, 10, e 11, talvez possam ser derivadas de ruídos provenientes do meio, o que é plausível levando em conta a área investigada estar em um cenário urbano e possivelmente conter cabos e tubulações em seu subsolo. Além do fato dos arranjos Wernner e Schlumberger não marcarem essas zonas de baixa resistividade.

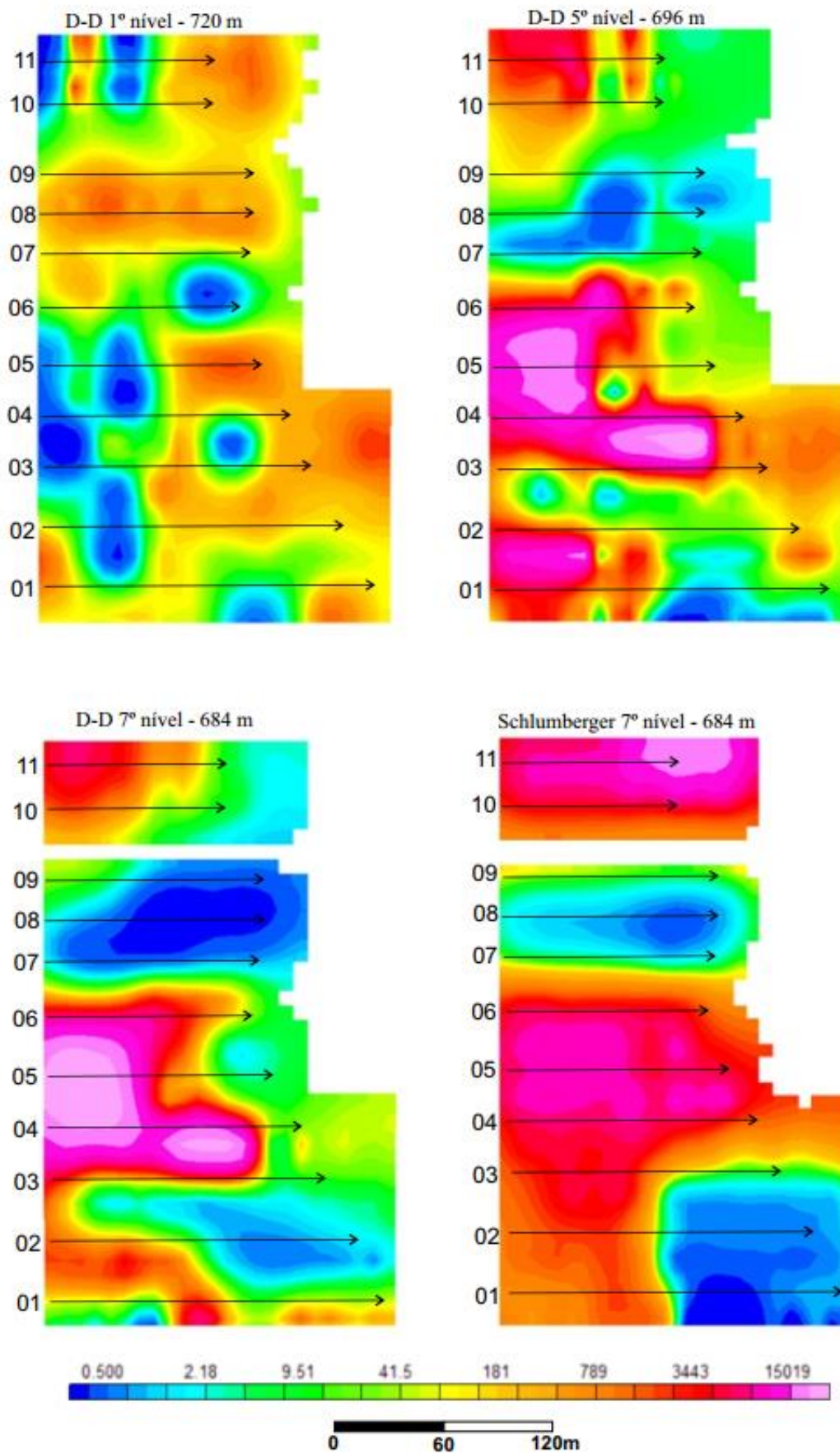


Figura 38: Mapas de alguns níveis de profundidade para os arranjos D-D e Schlumberger

7.6 Correlação entre as ZBR's e Locais dos Sepultamentos

Como dito anteriormente as zonas de baixa resistividade (ZBR) presentes nas sessões representam possíveis alterações do meio físico, causadas pela influência da infiltração do necrochorume no subsolo, oriundo dos sepultamentos. Um dos objetivos desse trabalho é identificar uma possível correlação espacial entre as quadras de maiores quantidades de sepultamentos com as zonas de baixa resistividade marcadas nas seções geolétricas.

Assim confeccionou-se o mapa de frequência de sepultamentos por quadra (Figura 24). A seguir foi feita a integração em uma única figura, para cada arranjo (Figuras 39, 40 e 41), sobrepondo os dados do mapa de sepultamentos, mais o fluxo de águas subterrâneas, um mapa multinível de cada arranjo, e as linhas de imageamento elétrico.

Foi escolhido o mapa do 7º nível para essa sobreposição dos dados e mapas em um figura integrada. Justificando-se pelo fado do fluxo da água em meio subterrâneo ser um tanto caótico na zona não saturada (níveis mais rasos), por isso a preferência por níveis próximos ou contidos na zona saturada, possibilitando uma correlação mais clara.

Levando em conta o resultado do ensaio do permeâmetro de Guelph, que indica um solo arenoso de alta permeabilidade, e a zona de baixa resistividade presente nos mapas integrados para cada arranjo, a qual cobre uma boa parte da área do subsolo do cemitério, como mostram as figuras a seguir, pode-se inferir que o necrochorume tenha se disseminado pelo subsolo do cemitério, causando alteração do meio físico.

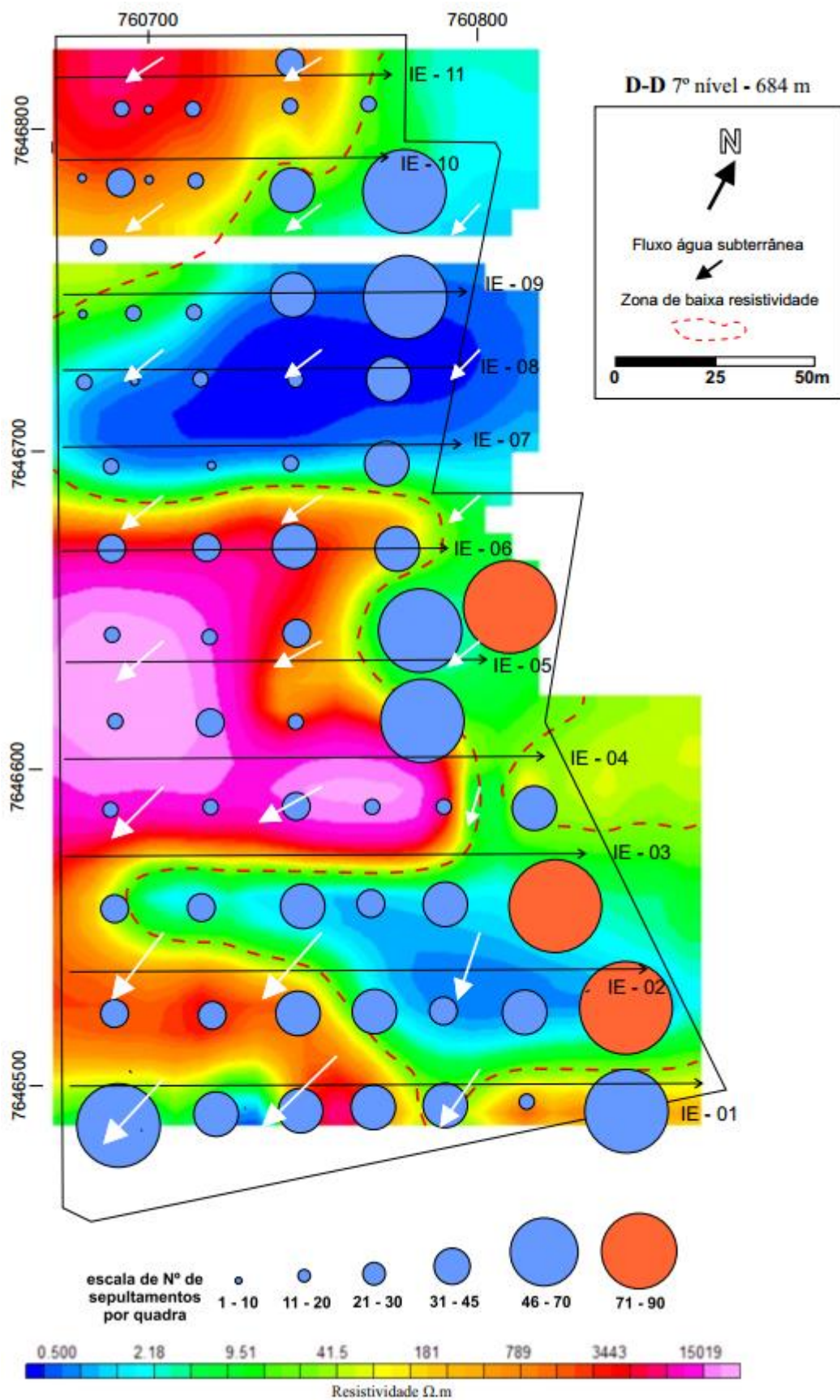


Figura 39: Mapa integrado D-D mostrando correlação entre ZBR's e locais dos sepultamentos.

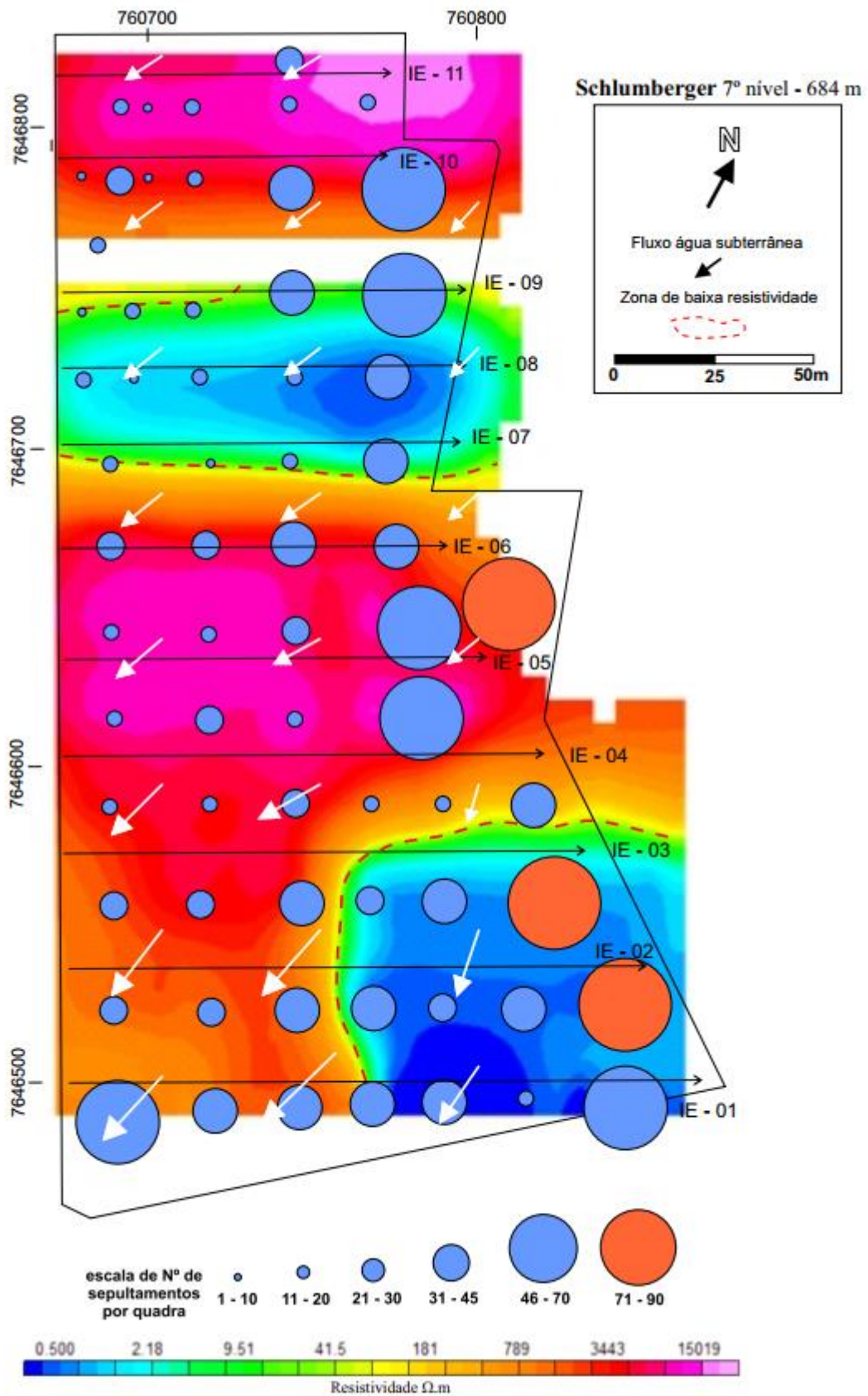


Figura 40: Mapa integrado Schlumberger mostrando correlação entre ZBR's e locais dos sepultamentos.

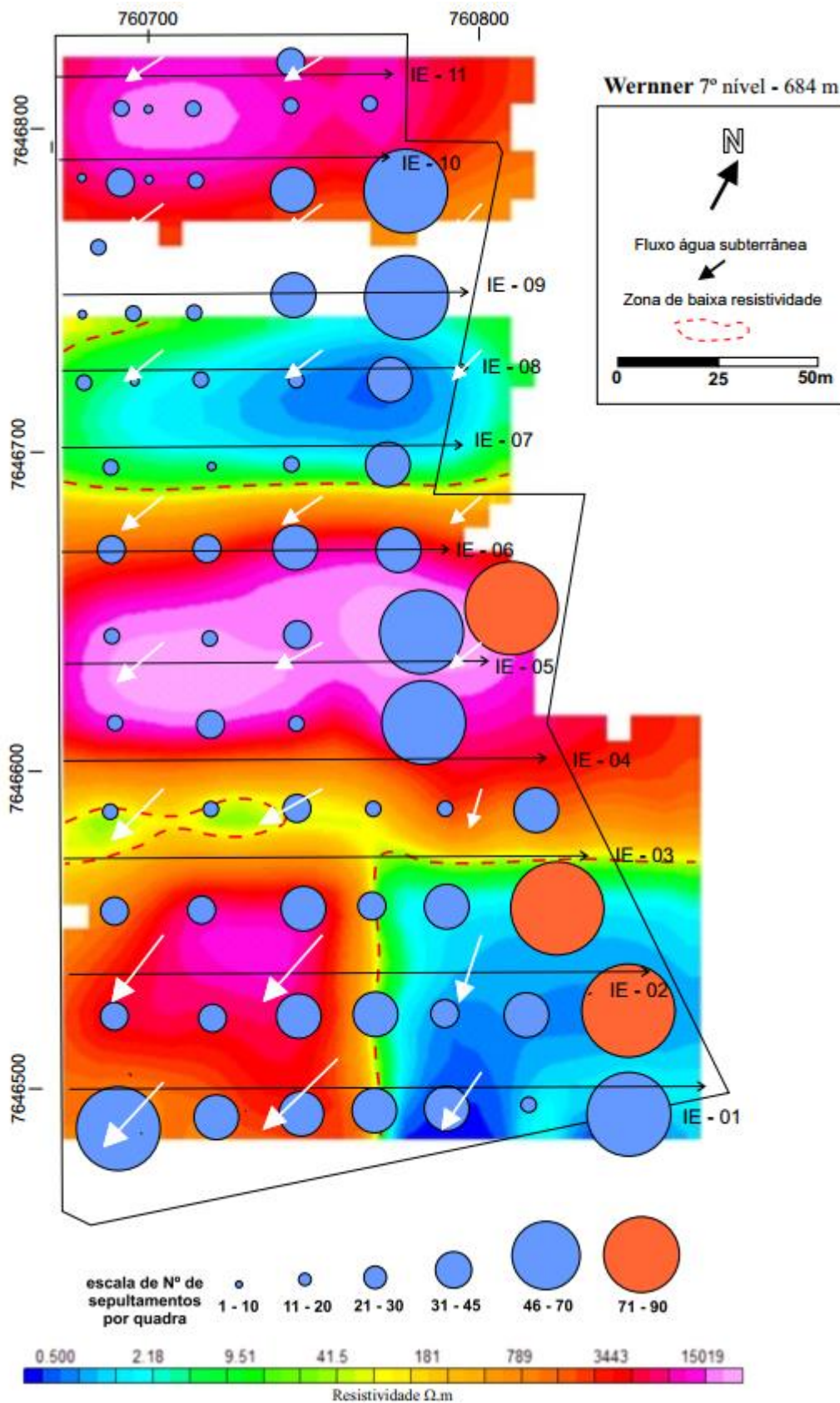


Figura 41: Mapa integrado Wenner mostrando correlação entre ZBR's e locais dos sepultamentos.

As quadras com maiores quantidades de sepultamentos encontram-se próximas ao limite leste da área do cemitério. Percebe-se pelo mapa integrado arranjo D-D (figura 39), como as porções de menores valores de resistividade, na faixa de 1 Ω .m a 2 Ω .m, (cores próximas do azul) da ZBR, parecem delongar-se em direção aproximada ao do fluxo subterrâneo (SW), porém com tendência mais forte a oeste. No entanto, a ZBR como um todo tem um formato preferencial na direção N-S, com essas porções acima citadas delongando-se a oeste, o que sugere um razoável acompanhamento da direção do fluxo subterrâneo.

Já para os arranjos Schlumberger e Wenner a zona de baixa resistividade é menor e menos difusa, como mostram as figuras 40 e 41. Pois esses arranjos apresentaram menor quantidade de ZBR's que o arranjo D-D em suas seções.

Uma interpretação possível seria correlacionar essa zona de baixa resistividade com o necrochorume gerado pelas quadras de maiores quantidades de sepultamentos (faixa de 46 a 90 sepultamentos por quadra), atrelado ao fluxo e topografia do terreno. Nota-se que essas quadras se sobrepõe com boa delimitação a zona de baixa resistividade, principalmente para o mapa do arranjo D-D, como na parte leste. Em Wenner e Schlumberger essa delimitação ocorre com menor precisão.

Assim, segundo essa interpretação, a alteração do meio físico teria tido como principal causa o necrochorume gerado nas quadras com faixa de 46 a 90 sepultamentos, e uma menor influência das quadras de menores números de sepultamentos.

Os ensaios geoeletricos mantiveram-se dentro dos limites do cemitério, porém as últimas quadras, adjacentes ao limite sul do cemitério, tiveram elevado números de sepultamentos, notando-se até uma pequena área de baixa resistividade na Figura 39. Levando isso em conta, e mais o fluxo subterrâneo, há boa possibilidade da área externa ao limite sul do cemitério também apresentar o mesmo tipo de alteração física constatada pelos ensaios geoeletricos no interior do cemitério. Em outras palavras, a ZBR se estenderia na direção sul para fora dos limites do cemitério.

8 CONCLUSÃO

Conforme o objetivo proposto para este trabalho, conclui-se que a aplicação do método da eletrorresistividade para a investigação de alterações do meio físico na subsuperfície do Cemitério da Saudade, município de Monte Alto, foi satisfatório. O método foi eficiente para detectar as alterações do meio físico causadas provavelmente pela infiltração do necrochorume.

As SEV's realizadas no interior do cemitério foram úteis na determinação do nível freático (10 m), e possibilitaram a confecção do mapa potenciométrico da área, o qual mostra um fluxo da água subterrânea na direção SW, concordante com a topografia do terreno que apresenta leve declividade. Os dados de permeabilidade indicaram um solo arenoso de alta permeabilidade, o que facilita a percolação do necrochorume em subsuperfície.

No tocante aos tipos de arranjos utilizados na aplicação do método da eletrorresistividade, os três tipos se mostraram eficientes para os objetivos propostos. As seções geoeletricas geradas para os diferentes arranjos são bem semelhantes entre si. A começar pelas seções de referência do meio físico não alterado, nas quais, para os três arranjos, o valor de resistividade mínimo foi de 41,5 Ω .m, valor este que foi usado como limite para determinar as zonas de baixa resistividade.

As seções geradas para os arranjos Wenner e Schlumberger são extremamente parecidas, com raras diferenças significativas. Já as seções para o arranjo D-D se diferenciam um pouco desses dois, pois elas marcam zonas de baixa resistividade não presentes nestes. Principalmente nos níveis mais profundos, como mostra a comparação dos mapas multiníveis do 7º nível (Figura 38), as linhas IE-04, 05, 06, 10 e 11 do arranjo D-D marcam zonas de baixa resistividade na porção leste do mapa, e as de Wenner e Schlumberger marcam zonas resistivas. Levando isso em conta, e a razão sinal/ruído que o arranjo D-D possui com o aumento da profundidade investigada, essas ZBR's em profundidade presentes nas seções de D-D, podem ser derivadas de ruídos provenientes do meio.

A pesquisa documental acerca do número de sepultamentos no cemitério foi fundamental, tendo como produto o mapa de frequência de sepultamentos por quadra dos últimos 5 anos, antecedentes ao ensaio geofísico. Sobrepondo o mapa

de frequência de sepultamentos a um dos mapas multiníveis D-D em profundidade (mapa integrado D-D, figura 39), nota-se como as quadras de maiores números de sepultamentos ficam bem delimitadas as zonas de baixa resistividade, fornecendo uma confirmação da relação espacial entre as zonas de baixa resistividade e as quadras de maiores quantidades de sepultamentos. Já para os arranjos Wenner e Schlumberger essa delimitação é menos evidente.

Os modelos multiníveis, que estão dispostos em anexo, ajudaram para uma visualização em mapa, da variação da resistividade para diferentes níveis de profundidade na área do cemitério. Esses produtos foram bastante úteis para uma comparação mais global entre os arranjos, e para a sobreposição com os dados do mapa de sepultamentos, deixando clara a relação entre eles.

Por fim, a realização deste trabalho é uma confirmação da eficiência do método da eletrorresistividade na investigação ambiental em cemitérios, com suspeita de contaminação por necrochorume. Tanto como um método indireto, e portanto, apropriado para áreas como os cemitérios, como também um pré estudo que auxilie em um planejamento mais otimizado para os métodos invasivos.

Referências Bibliográficas

ALMEIDA A.M. da & MACÊDO J.A.B. de. **Parâmetros físico-químicos de caracterização da contaminação do lençol freático por necrochorume**. In: Seminário de gestão Ambiental. Juiz de Fora. Anais... Juiz de Fora: Instituto Viana Junior, 2005;

ALMEIDA, F. F. M. de – **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. Bol. Inst. Geogr. e Geol. n.41, São Paulo, 1964;

AMUNO, S.A.; AMUNO, M.M. (2014) **Spatio-temporal variation of trace element contents in Rwanda necrosols**. *Environment Earth Science*, v. 71, p. 659-674.

BANTON, O. **Field and laboratory-determined hydraulic conductivities considering anisotropy ad core surface area**. *Soil Sci. Soc. of Am.* v.57 (1), 1993.

BARCELOS J.H. & SUGUIO K. 1987. **Correlação e extensão das unidades litoestratigráficas do Grupo Bauru definida em território paulista, nos estados de Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso do Sul e Paraná**. In: SBG/Núcleo SP, Simpósio Regional de Geologia, 6, RipClarp, Atas, 1:313-321.

BERGAMO, H. **Os Cemitérios – Um problema de engenharia sanitária**. In: Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária, IV. São Paulo, Anais. São Paulo, AIES, p.333-339. 1954;

BOUWER, H. **Groundwater hydrology**. New York: Mc Graw Hill, 1978. 4c0 p.;

CARVALHO JUNIOR, M. A. F.; COSTA E SILVA, L. M. **SP e eletrorresistividade aplicados ao estudo hidrogeológico de um cemitério**. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE GEOFÍSICA, 5., 1997, São Paulo. Resumo Expandido... São Paulo: Sociedade Brasileira de Geofísica, 1997. v.1, p. 471-474.

CASTRO, D. L. Caracterização geofísica e hidrogeológica do cemitério Bom Jardim, Fortaleza - CE. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 26, n. 3, p. 251-271

DEGROOT-HEDLIN, C.; CONSTABLE, S. **Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models form magnetotelluric data**. *Geophysics*, n. 55, p. 1613–1624, 1990.

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA - DAEE. Estudo de águas subterrâneas - regiões administrativas 10 e 11 - Presidente Prudente e Marília. São Paulo: DAEE, 1979. v. 1 e v. 2

DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA – DAEE; INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS – IPT; INSTITUTO GEOLÓGICO – IG; COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS – CPRM. Mapa de Águas Subterrâneas do Estado de São Paulo. Escala 1.000.000. São Paulo: DAEE, IPT, IG, CPRM, 2005.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL – CETESB. **Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas**. Programa CETESB/GTZ. São Paulo, 2001. 385p.

DENT, B.B., 1995. **Hydrogeological Studies at Botany Cemetery**. Sydney, M.Sc. Proj. Rept.- University of Technology of Sydney, 1995;

DENT BB, Knight MJ. **Cemeteries: a special kind of landfill. The context of their sustainable management**. In: Weaver TR, Lawrence CR (eds) Proc Int Groundwater Conf, 8–13th February, Melbourne. International Association of Hydrogeologists (Australian National Chapter), Indooroopilly, Australia, pp 451–456. 1998;

EDWARDS, L. S. **A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization**. Geophysics, n. 42, p. 1020-1036, 1977.

FACHIN, S. J. da S. **Ensaio geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto-SP: avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental do problema**. Dissertação (Mestrado) — Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo, IGC-USP, São Paulo-SP, 2007.

FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 11. ed. Belo Horizonte: Itatiaia, v.1 p. 500-566. 1980;

FÁVERO, F. **Medicina Legal**. 12ª ed. Belo Horizonte: Vila Rica Editoras Reunidas, 1991;

FELICIONI, F. ANDRADE, F. F. A. BORTOLOZZO, N. **A Ameaça dos Mortos**. 1ª ed. Editora Maxprint. Jundiaí, SP. 2007;

FERNANDES L. A. & COIMBRA A.M. 1994.0 **Grupo Caiuá (Ks): revisão estratigráfica e contexto deposicional**. Rev. Brás. Geociências, 24(3): 164-176.

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. 2000. **Revisão estratiográfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo)**. Revista Brasileira de Geociências, São Paulo, v. 30, n. 4, p. 723-734, 2000

FLORENCE, G. & PACHECO, J. 1929. **Carta Geológica do Estado de São Paulo, Brasil São Paulo**, Com. Geogr. Geol. Escala 1:2.000.000.

FRANÇA, G. V. de. **Medicina Legal**. 2ª.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 402p. 1985;

GANDOLFO O.C.B. **Um Estudo do Imageamento Geoelétrico na Investigação Rasa**. Tese doutorado (Geociências)- Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 215p. 2007;

GEOTOMO SOFTWARE. **RES2DINV ver. 3.56 for Windows 98/Me/2000/NT/XP**: User's Manual. Penang, Malasya: Geotomo Software, 138p. 2007;

GIBBS, Lois M. **Love Canal. 20th anniversary revised edition**. Gabriola Island, New Society Publishers, 1998.

GONZAGA DE CAMPOS, L.F. 1905. **Reconhecimento da zona compreendida entre Bauru e Itapura**. São Paulo, E. F. Noroeste do Brasil. Tipografia Ideal. 40p.

GREENHOUSE, J.P. "**Aplicações de Metodologias Geofísicas em Estudos Ambientais e Geotécnicos**". CEA/UNESP Rio Claro, 111pp. 1996;

GRIFFITHS, D. H.; BAKER, R. D. **Two-dimensional resistivity imaging and Modeling in areas of complex geology**. *Journal of Applied Geophysics*, v. 29, p. 211-226, 1993.

HALLOF, P. G. **On the interpretation of resistivity and induced-polarization measurements**. 1957. Thesis (Ph. D.) – MIT, Cambridge, 1957.

INTERPEX LIMITED. IX1D v. 2.18. **Interpex Limited**, 2009;

JONKER, C.; OLIVIER, J. (2012). **Mineral contamination from cemetery soils: case study of Zandfontein Cemetery, South Africa**. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, n. 9, p. 511-520. DOI: 10.3390/ijerph9020511.

KELLER, G. V. & FRISCHKNECHT, F. C. **Electrical Methods in geophysical prospecting**. Oxford: Pergamon Press. 1966, 517p.

KNODEL, K.; LANGE, G.; VOIFT, H.-J. **Environmental Geology – Handbook of Field Methods and Case Studies**. Springer, Germany, 2007.

LOWRIE W. **Fundamentals of Geophysics** 2 edition. Cambridge University Press, New York, 377p. 2007;

LOKE, M.H. & BARKER, R.D. **Practical techniques for 3D resistivity surveys and data inversion: Geophysical Prospecting**, 44, 499–523. 1996;

LOKE, M. H.; BAKER, R. D. **Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method: Geophysical Prospecting**, n. 44, p. 131–152, 1996.

LOKE, M. H. 2000. **Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: a practical guide to 2-D and 3-D surveys**. Report Geotomo LLC, Penang, Malaysia. 67. p., 2000.

MAACK, R. 1941. **Algumas observações a respeito da existência e da extensão do arenito superior São Bento ou Caiuá no Estado do Paraná**. Arc. Mus. Par., 2:107-129.

MANZINI, F.F. **O Cretáceo da região de Monte Alto – SP**. Rio Claro, 1990. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

MATOS, B. A. **Avaliação da ocorrência e do transporte de microorganismos no aquífero freático do cemitério de Vila Nova Cachoeirinha, município de São Paulo**. São Paulo, 115p. Tese de Doutorado – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2001;

MATOS, B.A.; PACHECO, A. **Ocorrência de microrganismos no aquífero freático do cemitério Vila Nova Cachoeirinha**, São Paulo. In: Congresso Mundial Integrado de Águas Subterrâneas, 1., Fortaleza, 2000. Anais. Fortaleza, ABAS. 1 CD-ROM. 2000;

MENDES, J. M. B.; PACHECO, A. ; HASSUDA, S. **Cemitérios e meio ambiente - a geofísica como método auxiliar na avaliação de sua influência nas águas subterrâneas**. Encontro Nacional de Estudos Sobre o Meio Ambiente, 2, Florianópolis-SC, 1989. Anais. Florianópolis, UFSC, v. 1, p. 50-57. 1989;

MILANI, E. J.; MELO, J. H. G.; SOUZA, P. A.; FERNANDES, L. A. & FRANÇA, A. B. **Bacia do Paraná**. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v.15, n.2, p. 265-287, 2007.

MIGLIORINI, R. B. **Cemitérios Contaminam o Meio Ambiente? Um Estudo de Caso.** Cuiabá, EdUFMT, 50p. 2002;

MIOTTO, S. L. Aspectos geológico-geotécnicos da determinação da adequabilidade de áreas para implantação de cemitérios. 1990. 116 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 1990;

MIGLIORINI, R. B. **Cemitérios como Fontes de Poluição em Aquíferos. Estudo do Cemitério Vila Formosa na Bacia Sedimentar de São Paulo.** Dissertação de Mestrado do programa pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeológicos do Instituto de Geociências da USP, 74 p., 1994;

NASCIMENTO, W.G. **Investigação geofísica ambiental e forense nos cemitérios do Bengui e do Tapanã (Belém – PA).** Dissertação (Mestrado em Geofísica), Instituto de Geociências, UFPA. Belém 153 f, 2009;

ORELLANA 1972 ORELLANA, E. **Prospeccion Geoelectrica en Corriente Continua.** Biblioteca Tecnica Philips, Madrid, España: Paraninfo, 523p. 1972;

ORTIGÃO, J. A. R. **Introdução à Mecânica dos Solos dos Estados Críticos.** Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora, 1995.

PACHECO, A. **Os cemitérios como risco potencial para águas de abastecimento.** Revista do Sistema de Planejamento e de Administração Metropolitana. São Paulo, ano IV, n.17, p.25-37. 1986;

PACHECO, A.; MENDES, J.M.B.; MARTINS, M.T.; HASSUDA, S.; SILVA, A.A.K. **Cemeteries – A potential risk to groundwater.** Revista “Water Science and Technology”. Great Britain, v.24. n.11. p.97-104. 1991;

PACHECO, A. **A visão da Problemática Ambiental que Envolve os Cemitérios.** In: SEMINÁRIO: CEMITÉRIOS, UMA QUESTÃO AMBIENTAL, 1., 1996, São Paulo. Anais... São Paulo: Faculdade de Saúde Pública/USP, 1996.

PACHECO, A.; MATOS, B. A. Cemitérios e meio ambiente. **Tecnologias do Ambiente,** Lisboa, n. 33, p. 97-104, 2000.

PACHECO, A. **Cemitério e Meio Ambiente.** Universidade de São Paulo – Instituto de Geociências. (Tema de Livre docência). USP, Dedalus, 102p. 2000;

PACHECO A, BATELLO E. A influência dos fatores ambientais nos fenômenos transformativos em cemitérios. Rev Engenharia & Arquitetura. 2:32-39. 2000;

POUNDER, D. J. **Postmortem changes and time of death**. 1995; Disponível em <http://www.dundee.ac.uk/forensicmedicine/llb/timedead.htm>;

RAGAB, R.; COOPER J. D. **Variability of unsaturated zone water transport parameters: Implications for hydrological modelling.1. In situ measurements**. Journal of Hydrology. v.148, 1990.

REYNOLDS J. M. **An Introduction to Applied and Environmental Geophysics** 2.ed. The Atrium, Chichester, West Sussex, UK, 642p. 2011.

REYNOLDS, W. D. ; ELRICK, D. E. In situ measurement of field saturated hydraulic conductivity sorptivity and the α -parameter using the Guelph permeameter, Soil Science, v.140, 1985.

ROMERO, J.C. **The movement of bacteria and viruses through porous media**. Ground Water, v. 8, n. 2, p. 37-48. 1970;

ROY, A. & APPARAO A. **Depth of investigation in direct current methods**. Geophysics, v.36, n.5, 1971.

SILVA, L. M. Os **Cemitérios na Problemática Ambiental**. I Seminário Nacional "Cemitérios e Meio Ambiente", SINCEP e ACEMBRA. São Paulo, 1995

SILVA, L. M. **Cemitérios: Fonte Potencial de Contaminação dos Aquíferos Livres**. 4º Congresso Latino-Americano de Hidrologia Subterrânea. Montevideo, Uruguai – ALHSUD – 1998;

SILVA, R.W. da C. **Aplicação do método da eletrorresistividade na investigação e mapeamento da contaminação por cemitérios – o exemplo do cemitério de Vila Rezende, Piracicaba/SP**. (Dissertação de Mestrado). UNESP/IGCE/Rio Claro, p.156 f. 2008;

SILVA R.W.da C. & MALAGUTTI FILHO, W. **Emprego do Imageamento Elétrico no Estudo da Contaminação por Cemitérios**. Revista Geociências – UNESP, v.29, n.3, São Paulo, 2010;

SOARES, P.C.; LANDIM, P.M.B.; FÚLFARO, VJ. & SOBREIRO NETO, A.F. 1980. **Ensaio de caracterização do Cretáceo no Estado de São Paulo: Grupo Bauru**. Rev. Bras. Geoc., 10(3): 177-185

SPONGBERG, A. L & BECKS, P. M. **Inorganic soil contamination from cemetery leachate.** Journal “**Water, air and soil pollution**” vol. 117, no1-4, pp. 313-327. 2000;

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** 2.ed. Cambridge: Cambridge University Press, 744p. 1990;

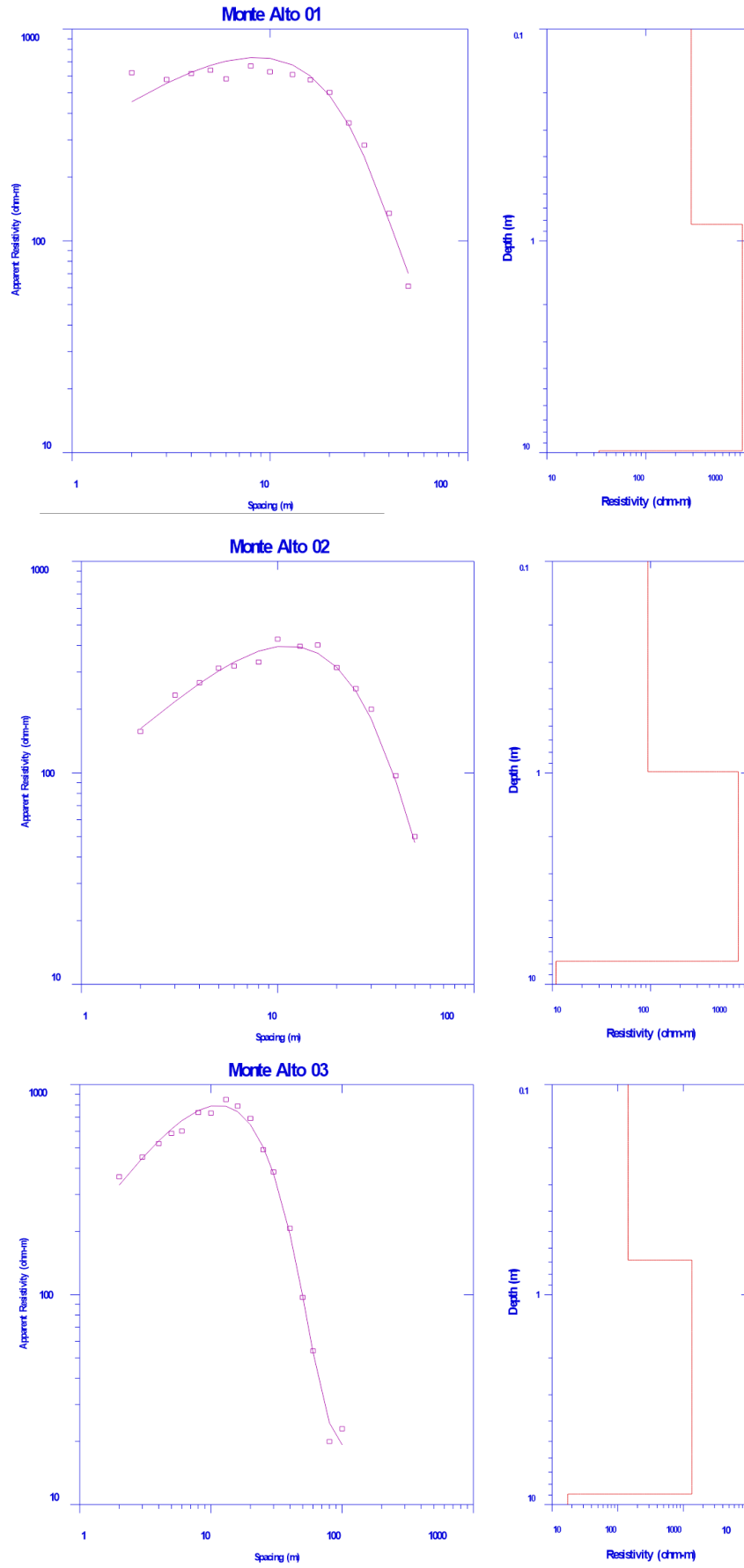
WARD, S.H. **Resistivity and induced polarization methods.** USA. Investigations in Geophysics, no 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed.Stanley H. Ward, v. I, p. 147-189. 1990

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **The impact of cemeteries on the environment and public health. An introductory briefing.** Copenhagen, Denmark, WHO Regional Office for Europe. 11 p. (Rept. EUR/ICP/EHNA 01 04 01 (A)). 1998;

XAVIER, F. V. **Métodos Geométricos Aplicados ao Estudo de Anomalias Geofísicas Subsuperficiais no Cemitério Municipal de Rio Claro, SP.** Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. 2014;

XAVIER et al. **Emprego da sondagem elétrica vertical integrada às análises químicas e microbiológicas no diagnóstico preliminar da contaminação do solo e da água subterrânea no cemitério municipal da cidade de Rio Claro (SP).** Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 23, p. 1-12, 2018.

ANEXO I



ANEXO II

Werner

Schlumberger

Dipolo-Dipolo

