



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



Trabalho de Conclusão de Curso de

Graduação em Geologia

DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL POR MEIO DA
TOMOGRAFIA ELÉTRICA NO SEGUNDO BATALHÃO LOGÍSTICO LEVE DE
CAMPINAS – SP

Laura Mendonça Arantes

Prof. Dr. César Augusto Moreira

Rio Claro – SP
2019

UNIVERSIDADE ESTADUAL
PAULISTA

Instituto de Geociências e Ciências

Exatas Câmpus de Rio Claro

LAURA MENDONÇA ARANTES

DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL
POR MEIO DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA NO SEGUNDO
BATALHÃO LOGÍSTICO LEVE DE CAMPINAS – SP

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

Rio Claro - SP

2019

A662d Arantes, Laura
Diagnóstico da contaminação por óleo diesel por meio da tomografia elétrica no Segundo Batalhão Logístico Leve de Campinas - SP / Laura Arantes. -- Rio Claro, 2019
46 p. : il., fotos, mapas

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Geologia) - Universidade Estadual Paulista (Unesp), Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Rio Claro
Orientador: César Augusto Moreira

1. Geofísica. 2. Contaminação. 3. Resistividade. 4. Derramamento por óleo. 5. Degradação. 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).

LAURA MENDONÇA ARANTES

DIAGNÓSTICO DA CONTAMINAÇÃO POR ÓLEO DIESEL
POR MEIO DA TOMOGRAFIA ELÉTRICA NO SEGUNDO
BATALHÃO LOGÍSTICO LEVE DE CAMPINAS – SP

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

Comissão Examinadora

_____ (orientador)

Rio Claro, ____ de _____ de _____.

Assinatura do(a) aluno(a)

assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Dedico este Trabalho de Conclusão de Curso aos meus pais Lauro Arantes Junior e Maria Tereza Mendonça Arantes, que me deram todas as oportunidades para que pudesse chegar até aqui, todo apoio e carinho por todo o trajeto. Tenho muita sorte de tê-los como pais. Também agradeço ao meu irmão Gustavo Mendonça Arantes por toda ajuda, conselhos e amparo. Não seria a mesma pessoa sem você.

Agradeço também as minhas amigas e companheiras da graduação Fernanda Buchi e Juliana Martuscelli, que estiveram comigo durante o período universitário, que fizeram parte dos meus dias e passaram pelas mesmas dificuldades e felicidades. Obrigada pelo companheirismo, por toda ajuda que me deram, pelas risadas e pelos conselhos. Amigos que levarei para o resto da vida. Ainda, agradeço a Lara Garcia pela amizade há mais de dez anos. Nossa amizade sobreviveu à distância, dramas e desencontros, então obrigada pelas conversas, conselhos e apoio por todos esses anos. Não seria o mesmo sem vocês.

Obrigada ao Segundo Batalhão de Logística Leve em Campinas pela ótima recepção, ajuda e informações. Obrigada também aos participantes da banca Fernanda Teles e Matheus Casagrande pela ajuda e esclarecimentos.

Um muitíssimo obrigado ao Prof. Dr. César Augusto Moreira, que permitiu a realização do trabalho com paciência, dedicação e energia em minha pesquisa e com certeza de muitos outros, sempre fazendo um ótimo trabalho. Um profissional que faz as coisas acontecerem, professor nato que é capaz de ensinar muito com clareza e simplicidade. Obrigada por toda dedicação.

Por ultimo, mas não menos importante, agradeço a Deus pelas graças, pelos desafios e por ter colocado tantas pessoas boas no meu caminho.

RESUMO

A contaminação do meio físico pode ocorrer pelo manejo inadequado de produtos nocivos e pela falta de planejamento. A caracterização dessas áreas por meio de técnicas de investigação através de métodos diretos como análises físicas e químicas são muito utilizadas no diagnóstico e monitoramento. Porém, apesar de apresentarem resultados quantitativos, não é representativo em termos espaciais. A proposta do trabalho é trazer a geofísica como diagnóstico para a detecção da pluma de contaminação. Na área de estudo, ocorreu um vazamento de óleo diesel pela falta de manutenção do tanque de abastecimento, que fora descoberto apenas em 2016, através de poços de monitoramento. O objetivo principal é avaliar a presença de contaminantes em fase residual e dissolvida em subsuperfície, a partir da técnica de Tomografia Elétrica (ETR), compreender os efeitos do processo de atenuação natural na degradação de hidrocarbonetos e alterações em propriedades elétricas em solo. Os resultados permitiram definir três padrões distintos de resistividade em região com presença de fase dissolvida, definida por análises físicas: baixos valores ($> 50 \Omega.m$) associada a presença de hidrocarbonetos em avançado estágio de degradação, valores intermediários ($260 \Omega.m$ e $115 \Omega.m$) indicativo da coexistência de hidrocarbonetos em fase residual e dissolvida. O diagnóstico de área com potencial acúmulo de fase residual pode levar ao planejamento de técnicas de remediação e promover a descontaminação da área.

Palavras chaves: derramamento, hidrocarboneto, eletrorresistividade, pluma de contaminação, passivo ambiental

ABSTRACT

The contamination of the physical environment can occur due to the improper handling of harmful products and the lack of planning. The characterization of these areas through research techniques using direct methods such as physical and chemical analysis are widely used in diagnosis and monitoring. However, despite presenting quantitative results, it is not spatially representative. The purpose of this paper is to bring geophysics as a diagnosis to detect the contamination plume. In the study area, a diesel oil spill occurred due to the lack of maintenance of the supply tank, which was discovered only in 2016 through monitoring wells.. The main objective is to evaluate the presence of contaminants in residual phase and dissolved in subsurface, from Electric Tomography (ETR) technique, to understand the effects of the natural attenuation process on hydrocarbon degradation and changes in electrical properties in soil. The results allowed to define three distinct resistivity patterns in a region with dissolved phase presence, defined in a history of chemical analysis: low values ($> 50 \Omega.m$) associated with the presence of hydrocarbons in advanced degradation stage and intermediate values ($260 \Omega.m$ and $115 \Omega.m$) which indicate the coexistence of hydrocarbons in residual and dissolved phase. The diagnosis of area with potential residual phase accumulation may support the planning of remediation techniques and promote the decontamination of the area.

Key words: leak, hydrocarbon, electroresistivity, contamination plume, environmental liability

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1: Local da área de estudos. Ponto A indica local do posto de abastecimento antigo e ponto B, do posto atual.	13
Figura 3.2: Imagem A exhibe os poços usados no monitoramento e a imagem B, o poço usado como referência	14
Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo	15
Figura 4.2: Localização do quartel na cidade de Campinas. Área em destaque situa os arenitos finos e os siltitos-argilosos.....	18
Figura 4.3: Esquemas de um aquífero poroso, aquífero fraturado e aquífero cárstico... 19	
Figura 4.4: Bacias do município de Campinas	21
Figura 5.1: Esquema de degradação de hidrocarbonetos.	25
Figura 6.1: Princípio da eletrorresistividade.....	29
Figura 6.2: Esquema do arranjo Schlumberger.	30
Figura 7.1: Esquema da distribuição das linhas de Tomografia Elétrica	31
Figura 7.2: Disposição da linha na área contaminada do antigo posto de abastecimento.	32
Figura 7.3: Tomografia elétrica a cerca de 30 m do posto de abastecimento atual.....	33
Figura 7.4: Resistivímetro.	33
Figura 7.5: Interface do software RES2DINV de um trabalho em um sítio contaminado por lubrificantes.....	34
Figura 8.1: Modelos de inversão de resistividade das linhas 1, 2, 3 e referência com destaque para as áreas de resistividade intermediária	36
Figura 8.2: Modelos de inversão de resistividade das linhas 4, 5, 6 e referência com destaque para as áreas de resistividade intermediária	37
Figura 8.3: Mapas de profundidade de resistividade com a zona contaminada em destaque para área pontilhada, sendo esta a provável localização do tanque.....	39

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
2	OBJETIVOS	12
3	LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA.....	13
4	GEOLOGIA REGIONAL	15
4.1	Hidrogeologia	19
5	ESTUDO BIBLIOGRÁFICO.....	22
5.1	Comportamento dos hidrocarbonetos no solo	22
5.2	Diagnóstico de Áreas Contaminadas	25
6	MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
6.1	Geofísica	27
7	AQUISIÇÃO DE DADOS	31
8	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	35
9	DISCUSSÃO	40
10	CONCLUSÃO.....	41
11	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	42

1 INTRODUÇÃO

Ao longo dos tempos, o homem transformou o ambiente, desenvolveu tecnologias e modificou a economia para que pudesse atender suas necessidades. Durante o século XX, a presença do setor petrolífero foi fundamental para tal feito, contribuindo muito para a economia mundial (SCHIRMER, 2004). Atualmente, o petróleo ainda se constitui como a principal fonte energética e sua demanda exige atenção para a elaboração de sua cadeia produtiva. Dessa forma, os meios de extração, armazenamento e logística mostram grande preocupação com os casos de contaminação por hidrocarbonetos no solo e na água.

A década de 1970 foi um período de grande desenvolvimento econômico no Brasil, época em que a maioria dos tanques de armazenamento foi construído pelo aumento das quantidades de postos revendedores de combustíveis. Como a duração de um tanque varia entre 15 a 20 anos, a partir da década de 1990, com a implementação de novas leis ambientais, surgiu-se uma preocupação com os vazamentos e a contaminação dos solos em que os revestiam (CUNHA *et al.* 2008). Já que os tanques se encontram no subsolo, seu monitoramento e controle são dificultados, requerendo técnicas específicas para sua mitigação.

A alta demanda e produção do petróleo e seus derivados aumentou as preocupações com o potencial de contaminação de solos e águas subterrâneas, principalmente por tanques de armazenamento subterrâneo em postos de combustíveis (FATORELLI, 2005). Em 2008, cerca de 78% dos casos de áreas contaminadas no estado de São Paulo tiveram relação com vazamento em postos de abastecimento, de acordo com a Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental (CETESB, 2010). Graças ao potencial contaminante, foi criada pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, a Resolução 273, no ano de 2009. Esta discorre especificamente sobre a instalação, operação e ampliação de postos de abastecimento, e considera que todo sistema de armazenamento seja entendido como empreendimento potencialmente poluidor, além de gerador de acidentes ambientais (CONAMA, 2009).

Quando liberados no solo, os hidrocarbonetos tendem a migrar por caminhos preferenciais das zonas saturadas, ou vadosa, por meio da gravidade e da capilaridade (PALUDO, 2007). Ela ocorre sempre em forma bifásica por conta da pouca miscibilidade em água dos compostos orgânicos. Os hidrocarbonetos pertencem à fase

líquida não aquosa chamada NAPL (*non-aqueous phase liquid*) e ainda são divididos de acordo com sua densidade: a de maior densidade DNAPL, e o de menor LNAPL, ambos igualmente imiscíveis em água (KULKAMP, 2003; MARIANO, 2006). Para os LNAPL, a tendência é que flutue sobre o corpo de água e espalhe lateralmente.

Nas contaminações subterrâneas por óleo diesel, os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs) são poucos solúveis em água e constituem a fração mais pesada dos hidrocarbonetos totais de petróleo (HTPs) pelo seu peso molecular ser maior, permitindo uma grande resistência ao transporte no meio subterrâneo. São estas que terão maior interação com o solo e o processo varia com as características do sistema solo/água e da composição do contaminante (D'AGOSTINHO, 2004). No entanto, de acordo com Labud *et al.* (2007), o efeito tóxico dos hidrocarbonetos de petróleo é maior em solos arenosos do que em solos argilosos.

Em virtude às preocupações de poluição no solo e nas águas subterrâneas, as pesquisas e técnicas para minimizar os danos são várias, dentre elas está a bioprospecção pela ação de bactérias, monitoramento por poços e métodos geofísicos. Dentre eles, os métodos geoeletricos são altamente recomendados para estudos ambientais pela sua natureza não invasiva, abrangência da área investigada, baixo custo de operação e rapidez e facilidade de aplicação. Sua utilização serve para detectar uma área afetada por poluentes, no mapeamento de sua extensão e também fornece a profundidade e direção do fluxo contaminado. Isso é possível pelo contraste que as características químicas dos resíduos refletem na condutividade elétrica de onde estão dispostos (BENSON *et al.*, 1982). Entre eles, podem ser destacados: Georadar, Eletrorresistividade e Polarização Induzida.

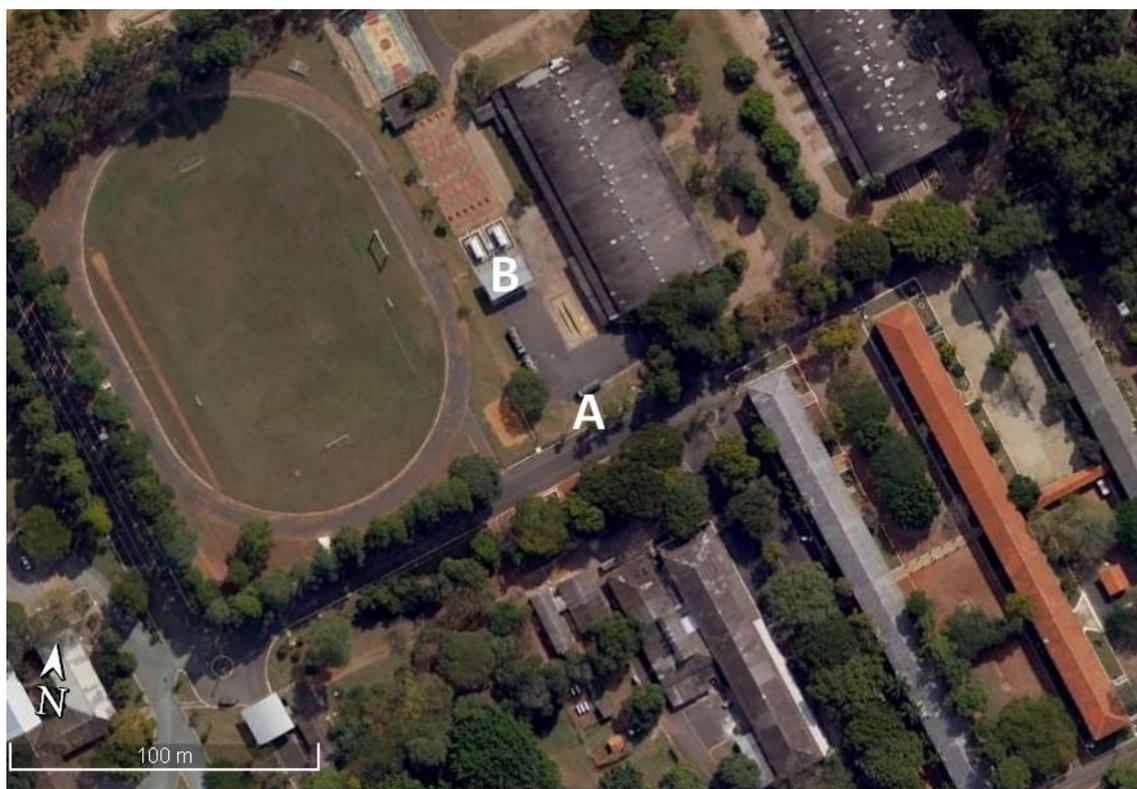
2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo a caracterização de uma pluma de contaminação por óleo diesel proveniente de um antigo posto de abastecimento no Segundo Batalhão Logístico Leve de Campinas – SP, determinar a profundidade afetada e a direção do fluxo dos resíduos.

3 LOCALIZAÇÃO E HISTÓRICO DA ÁREA

O estudo foi realizado no Segundo Batalhão Logístico Leve, do Exército Brasileiro, na cidade de Campinas – SP. O acesso é feito pela Rodovia Anhanguera (SP 330), situado a 96 km da cidade de São Paulo (Figura 3.1).

Figura 3.1: Local da área de estudos. Ponto A indica local do posto de abastecimento antigo e ponto B, do posto atual.



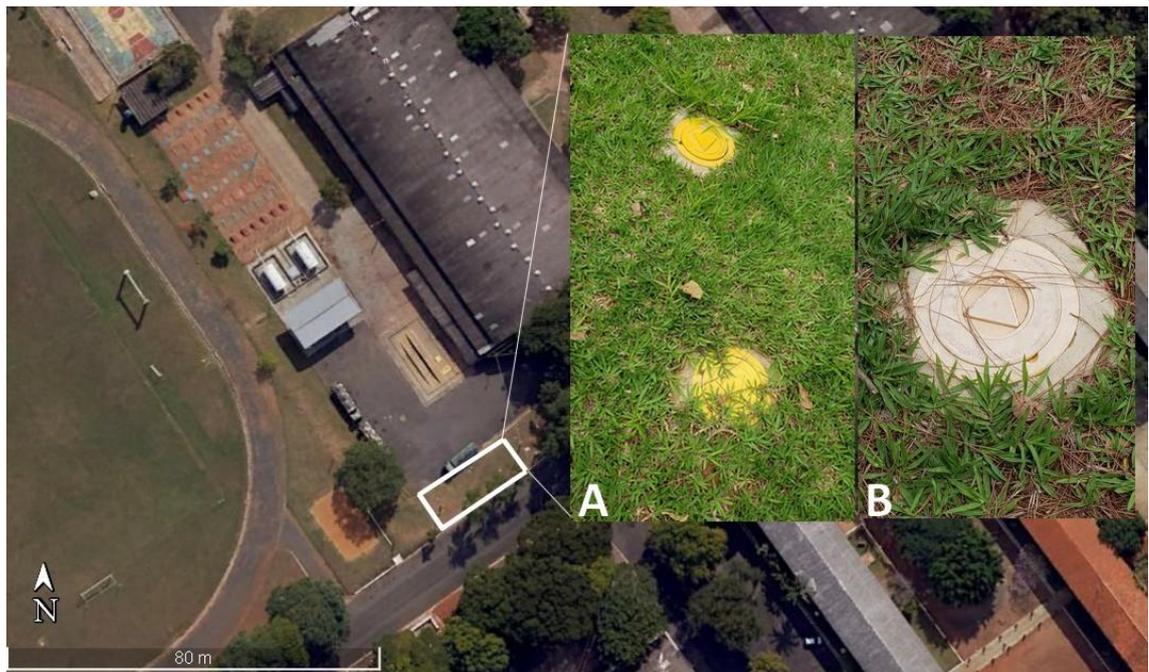
Fonte: Modificado de Google Earth

A unidade em Campinas é designada especificamente a logística do Exército, seja ela realizada por carros, tanques, helicópteros ou aviões. Com a abertura do quartel em 1974, houve uma parceria com a Petrobrás para suprir o abastecimento energético pelo óleo diesel da frota. O primeiro posto ficava na localização A da imagem e seu tanque ficou enterrado e intocado por 35 anos, quando em 2009, o posto foi transferido a outro lugar do quartel, destacado pelo ponto B na figura acima. Vale ressaltar que antes da construção do quartel, o local possuía apenas pequenos loteamentos.

Em 2016 foi relatado um vazamento na bomba do posto e a CETESB foi acionada. Pelos procedimentos feitos por monitoramento por poços (Figura 3.2), não fora

descoberta nenhuma contaminação ao redor do posto, porém, foi descoberta uma contaminação em locais usados para referência, ou seja, em que o solo devia estar livre de resíduos. O local de referência, no entanto, era onde o primeiro posto de abastecimento ficava. E em 2018, o Exército fez uma parceria com a Universidade Estadual Paulista com o objetivo de caracterizar a pluma de contaminação.

Figura 3.2: Imagem A exibe os poços usados no monitoramento e a **imagem B**, o poço usado como referência .



Fonte: Modificado de Google Earth

4 GEOLOGIA REGIONAL

A unidade litoestratigráfica, indicada na Figura 4.1 que inclui a área de estudo é chamada de Grupo Itararé, de idade Permo-Carbonífera, localizado na borda leste da Bacia do Paraná, e a camada mais espessa tendo cerca de 1500 m (PETRI, 1964).

Figura 4.1: Mapa de localização da área de estudo



Fonte: Adaptado de SUSS *et al*, 2014

O registro de sedimentação é resultante de sucessivos avanços e recuos de geleira durante o período de glaciação que ocorreu no Gondwana e envolveu paleoambientes deposicionais deltaicos a marinhos plataformais, ainda sujeita a glaciações e movimentos tectônicos. Além disso, é caracterizado por uma grande diversidade faciológica: conglomerados, arenitos, diamictitos, ritmitos e folhelhos com clastos caídos.

Oliveira (1927) propôs a definição de Série Itararé como depósitos com influência glacial na região sul de São Paulo e norte do Paraná. Leinz (1937) propôs um dos

primeiros ambientes deposicionais para o Grupo Itararé, que assumia a sedimentação predominantemente terrestre e reconhecia os depósitos de arenitos flúvio-glaciais. Petri (1964) e Rocha Campos (1967) foram os primeiros a mencionar as rochas do Grupo Itararé com a hierarquia de Subgrupo, que juntamente com o Subgrupo Guatá, constituíram a coluna litoestratigráfica do Grupo Tubarão. Foi Schneider *et al.* (1974), que após trabalho de mapeamento na região centro-norte de Santa Catarina e sul do Paraná, elevou formalmente a unidade Itararé para Grupo.

Trabalhos de França & Potter (1988) e França & Potter (1991) definiram que grupo era a melhor classificação para uma unidade tão espessa quanto o Grupo Itararé, subdividindo-as em unidades litoestratigráficas mapeáveis. Sendo elas três novas formações, com seções baseadas em perfis de poços: as Formação Lagoa Azul, Formação Campo Mourão e Formação Taciba. A Formação Campo Mourão, especificamente, é definida como uma unidade predominantemente arenosa, com também presença de folhelhos, siltitos e lamitos seixosos. Essa formação ocorre em praticamente toda a Bacia do Paraná, cobrindo uma área de cerca de 640.000 Km² e tem espessura máxima de 927 metros na região sudeste do estado de São Paulo.

Em Campinas ocorre simplificadaamente três tipos de terrenos geológicos. Na parte leste ocorrem as rochas de alto e médio grau metamórficos intrudidas por granitos e a oeste, rochas sedimentares do Grupo Itararé, diabásios (mesmo evento magmático gerador da Formação Serra Geral) e depósitos Cenozóicos (SÃO PAULO, 2009).

Os sills de diabásio intrudem as rochas do embasamento cristalino e o Grupo Itararé, principalmente a partir da região de Campinas para norte. Apresentam granulação fina a média e estrutura maciça, sendo mais abundantes e contínuos entre Paulínia e Campinas e a oeste de Santo Antônio de Posse (FERNANDES & MELO, 2004). São geralmente concordantes com as rochas encaixantes (SÃO PAULO, 2009).

Na porção ocidental da região de Campinas, o Grupo Itararé recobre as rochas do embasamento cristalino. São constituídos por arenitos, diamictitos, ritmitos, argilitos e conglomerados. Além disso, apresenta-se em contato discordante e erosivo, com mergulhos regionais suaves para oeste.

O Grupo Itararé é representado por quatro unidades: arenitos, ritmitos, associação de ritmitos com lamitos/diamictitos. Estas duas últimas unidades estariam na base estratigráfica e teriam se originado a partir de correntes de turbidez com ocasionais depósitos de corrida de lama em ambiente de plataforma ou planície deltáica. Os arenitos sobrepostos a estes representariam um sistema deltaico. Os arenitos com

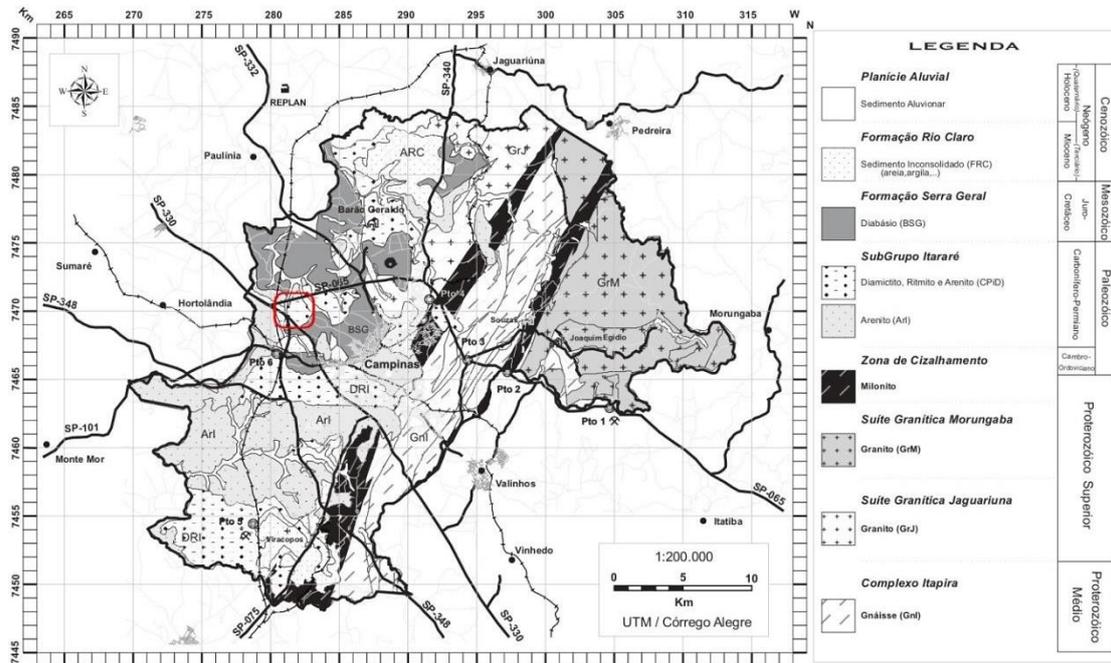
estratificação cruzada e acanalada corresponderiam aos canais distributários e os arenitos com estratificação sigmoidal à frente deltáica. Os sedimentos associados às geleiras são muito restritos e se assemelham a tilitos, que estão em contato irregular com o embasamento. Na porção oeste do município de Campinas os sills de diabásio da Formação Serra Geral intrudem o embasamento cristalino e o Grupo Itararé. Ocorrências ocasionais de arenitos com estratificação cruzada e com camadas de argilitos, assim como lamitos ricos em grânulos representam o Cenozóico (São Paulo, 2009).

Os depósitos Cenozóicos estão localizados na Depressão Periférica (região da Bacia do Paraná) e no Planalto Atlântico (Zona Cristalina do Norte e Subzona da Morraria de Jundiaí) (São Paulo, 2009). Na Depressão Periférica estes depósitos são controlados por soleiras locais, correspondendo à Formação Rio Claro e depósitos correlatos. Há divergência entre autores, surgindo ambiguidades em virtude de falta de datações precisas. A maioria dos autores acredita tratar-se de idade próxima ao limite Miocênica-Pleistocênica. Bistrichi (2001) apresenta dados palinológicos e paleobotânicos que indicam condições temperadas, com estações bem definidas para a seqüência do Mioceno Superior, na região de Atibaia-Bragança Paulista.

O Cenozóico é representado por ocorrências ocasionais de arenitos com estratificação cruzada e com camadas de argilito, além de lamitos ricos em grânulos. Os sedimentos da formação Rio Claro têm contato inferior discordante com as rochas do embasamento cristalino, Grupo Itararé Indiviso, Grupo Passa-Dois e do Grupo São Bento (formações Pirambóia, Botucatu e Serra Geral). Na parte superior, há contato com depósitos colúvio-eluviais areno-argilosos e lamíticos de fluxos gravitacionais (São Paulo, 2009). O ambiente deposicional é admitido como fluvial meandrante, ou ainda, de áreas alagadas. O clima durante a sedimentação era quente e úmido, indicado pelo intenso intemperismo químico (ausência de argilas esmectíticas e abundância de caulinitas dentríticas) (MELO *et al.* (1997).

O quartel está situado sob as rochas do Grupo Itararé, na cidade de Campinas (Figura 4.2), representados por arenitos finos silto-argilosos, que apresentam uma camada pouco espessa de solos coluvionares e/ou aluvionares junto aos vales. Além disso, há a presença de diamictitos e ritmitos.

Figura 4.2: Localização do quartel na cidade de Campinas. Área em destaque situa os arenitos finos e os siltitos-argilosos.



Fonte: SENNA & KAZZUO, 2010.

O Município de Campinas está inserido em dois grandes compartimentos geomorfológicos, o Planalto Atlântico, a leste, a Depressão Periférica, a oeste. Entre estes dois compartimentos há ainda uma área de transição.

O relevo é determinado por rochas gnáissicas do Complexo Itapira, graníticas das suítes Jaguariúna e Morungaba e miloníticas, a leste, parte do Planalto Atlântico; e de arenitos, ritmitos e lamitos do Grupo Itararé, junto com os diabásios da Formação Serra Geral a oeste como parte da Depressão Periférica (YOSHINAGA *et al.*,1995).

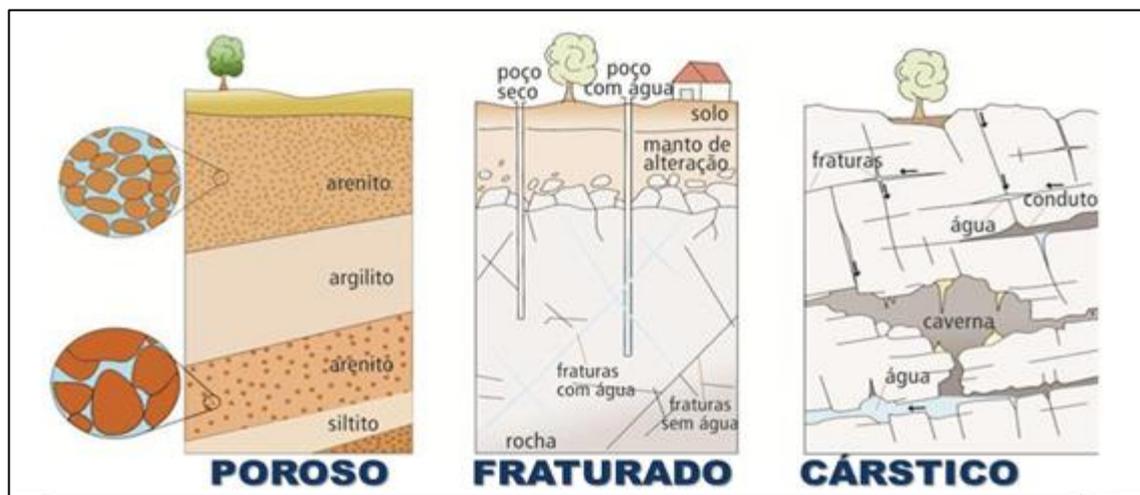
O Planalto Atlântico corresponde a relevos de morros e serras do Planalto de Jundiáí, onde as altitudes máximas atingem 990 metros (Serra das Cabras – limite sudoeste do município de Campinas) (SÃO PAULO, 2009). No primeiro compartimento ocorrem dois tipos de terrenos: os amorreados de inclinação moderada a forte e os amorreados ondulados a inclinados (YOSHINAGA *et al.*,1995). Na zona intermediária, nas zonas de cisalhamento Valinhos e Campinas, ocorrem os gnaisses bandados e rochas miloníticas, (SÃO PAULO, 2009). A Depressão Periférica é constituída por colinas e morrotes, com altitudes médias entre 600 e 700 metros. Neste compartimento ocorre quase a totalidade da malha urbana do município.

4.1 Hidrogeologia

De acordo com o Plano Diretor do município de Campinas, a cidade é dividida por cinco sub-bacias hidrográficas: a Bacia do Rio Jaguari, Bacia do Rio Atibaia, Bacia do Ribeirão Quilombo, Bacia do Rio Capivari e Bacia do Rio Capivari – Mirim (CAMPINAS, 2006).

No município de Campinas são encontrados três sistemas aquíferos (INSTITUTO GEOLÓGICO, 1993). O Diabásio compreende cerca de 19% da área da cidade, com ocorrência significativa na parte noroeste da cidade, é formado pelas intrusivas básicas correlacionáveis aos basaltos da Formação Serra Geral. O Tubarão, com cerca de 31% da área do município, ocorre na porção oeste do município e é constituído pelas rochas sedimentares do Grupo Itararé. E o Cristalino é suportado pelas rochas do Embasamento Cristalino, aflorando na porção leste de Campinas e compondo 50% da área desta. Os dois últimos distinguem-se como sistemas aquíferos regionais, enquanto o primeiro constitui um aquífero local (YOSHINAGA-PEREIRA e SILVA, 1997). O esquema destes aquíferos pode ser encontrado na Figura 4.3

Figura 4.3: Esquemas de um aquífero poroso, aquífero fraturado e aquífero cárstico.



Fonte: IRITANI & EZAKI, 2010

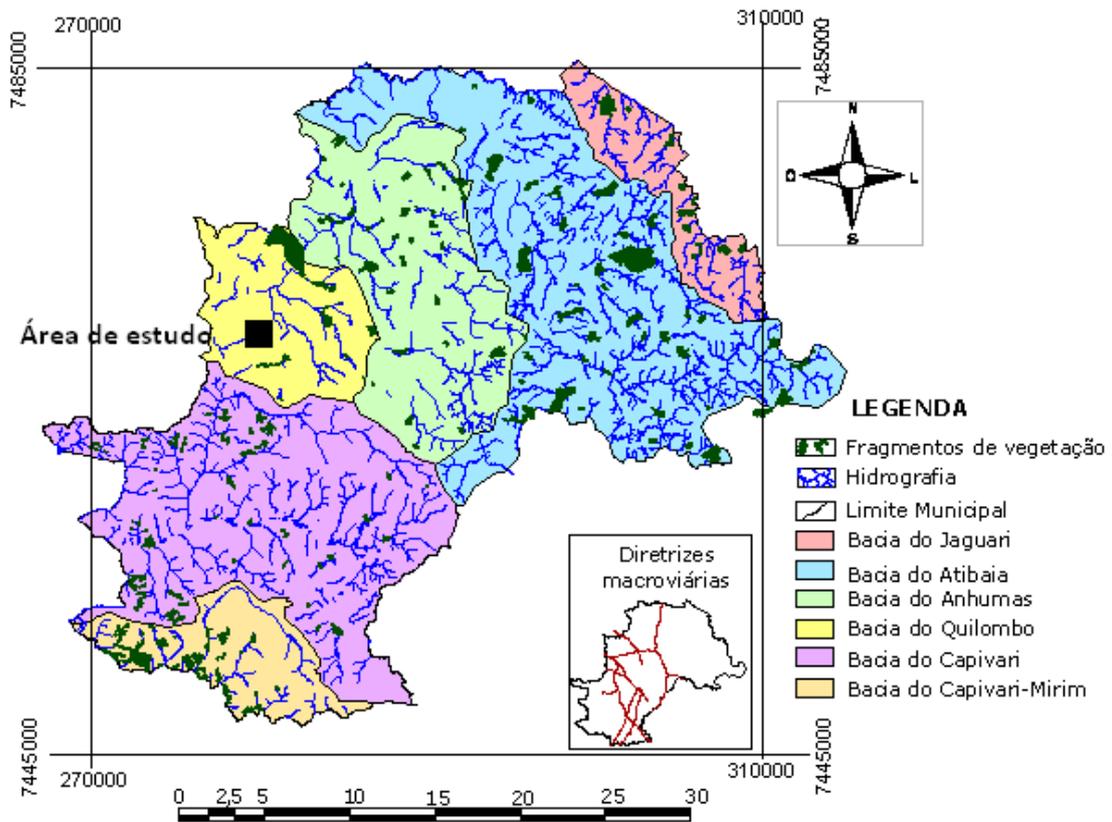
O aquífero Diabásio possui extensão limitada, é fissurado e descontínuo (CAMPOS, 1993). Seu sistema de fraturamento (zonas aquíferas) está relacionado a

esforços tectônicos decorrentes da movimentação da crosta terrestre (IRITANI e EZAKI, 2012).

O aquífero Cristalino possui extensão regional e suas zonas aquíferas estão associadas a fraturas e lineamentos, tendo profundidades de exploração variáveis entre 80 e 100 m (CAMPOS, 1993). Em geral, o sistema aquífero Cristalino apresenta-se bastante fraturado e praticamente todas as drenagens estão condicionadas às estruturas do terreno (YOSHINAGA-PEREIRA e SILVA, 1997). As fendas mais favoráveis ao armazenamento e fluxo da água subterrânea são posteriores à formação das rochas que constituem o aquífero e resultam dos esforços tectônicos que atuaram na crosta terrestre, como a separação dos continentes e a formação da Serra do Mar (IRITANI e EZAKI, 2012). De acordo com o tipo de porosidade fissural, o sistema aquífero do Cristalino pode ser dividido em: aquífero pré-cambriano, o qual apresenta porosidade fissural representada apenas por fraturas na rocha, constituindo uma baixa e variável produtividade, e aquífero pré-cambriano cárstico, que é representado por porosidade de origem cárstica, provocada pela dissolução de carbonatos das rochas calcárias presentes na unidade (IRITANI e EZAKI, 2012).

O quartel ocupa a Bacia do Quilombo (Figura 4.4), que está inserida no Aquífero Tubarão e constitui as Formações Aquidauana, o Grupo Itararé e o Grupo Guatá, repousando sob as rochas pré-cambrianas. O aquífero Tubarão é de extensão regional e descontínuo. Apresenta corpos arenosos intercalados com camadas de lamitos, ritmitos e siltitos (CAMPOS, 1993) e está em contato erosivo e discordante com o embasamento cristalino (YOSHINAGA-PEREIRA e SILVA, 1997). Apesar de sua dimensão regional, esse aquífero não apresenta características geológicas e hidrológicas homogêneas por toda sua extensão, sendo desse modo considerado de uma produtividade variável, já que seu espesso pacote sedimentar é muito heterogêneo (as camadas mais arenosas intercaladas às mais argilosas) e muitas vezes sem continuidade lateral (IRITANI e EZAKI, 2012). Esta descrição é típica para o município de Campinas, onde o aquífero é eventualmente truncado por sills ou diques de diabásio, o que dificulta o fluxo da água subterrânea, ou apresenta a ocorrência de fraturas que influenciam positivamente no potencial de produção do aquífero.

Figura 4.4: Bacias do município de Campinas



Fonte 1: VITTE *et al.*, 2010

5 ESTUDO BIBLIOGRÁFICO

A pesquisa teórica consiste em uma compilação de conceitos fundamentais sobre o trabalho. O levantamento foi feito com base de dados nacionais e internacionais com consultas online e acervo geral de teses e dissertações de universidades e instituições publicas ou privadas cujo objetivo seja a contaminação por óleo diesel e/ou o diagnóstico por métodos geoeletricos que caracterize seu uso e relevância.

5.1 Comportamento dos hidrocarbonetos no solo

De acordo com CONAMA (420/2009, art. 6, V), contaminação é definida por:

A presença de substância(s) química(s) no ar, água ou solo, decorrentes de atividades antrópicas, em concentração tais que restrinjam a utilização desse recurso ambiental para o uso atual ou pretendido, definidas com base em avaliação de risco à saúde humana, assim como os bens a proteger, em cenário de exposição padronizado ou específico.

Assim, atividades que implicam em impactos negativos aos recursos ambientais, devem ser submetidas a um gerenciamento de risco ecológico, a critério do órgão ambiental responsável na região.

Ainda, de acordo com a resolução 273/2000 do CONAMA, a classificação para posto de abastecimento (PA) é: instalação que possui equipamentos de armazenamento, com registrador de volume próprio para abastecimento de qualquer equipamento móvel (automóveis, aeronaves e embarcações).

O combustível, principal produto nos postos, pode ser extremamente toxico e nocivo a saúde se não manipulado, armazenado e transportado de forma correta. Os mais prejudiciais são os chamados compostos aromáticos formado pelo Benzeno, Tolueno, Etilbenzeno e Xileno. Estes compostos são denominados BTEX e são depressores do sistema nervoso central, podendo levar o individuo a morte caso ingerido ou inalado (GUIGUER, 1993). Por serem solúveis em água, possuem maior potencial de migração na água subterrânea, o que contribui grandemente para a expansão da pluma de contaminação. (CORSEUIL & MARINS, 1997)

De acordo com relatórios da CETESB, entre 1984 e 2006, os principais derramamentos eram de óleo diesel e gasolina, sendo 63% das contaminações da água e do solo se encontram no estado de São Paulo. Normalmente, as contaminações são provocadas por vazamentos em tanques subterrâneos ou tubulações de postos de abastecimento. No entanto, os acidentes só são percebidos depois que o produto aflora em esgotos ou redes de drenagens e abastecimento de água. (CETESB, 2006). A contaminação por óleo diesel aponta a presença de hidrocarbonetos totais de petróleo (HTP) na análise de solo e água subterrânea. Porém, também são encontrado hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), altamente tóxico. Quanto maior a presença de HPAs na água ou no solo, maior a toxicidade da contaminação (NETTO *et al.*, 2000).

Ao serem liberados para o meio ambiente através de vazamentos em tanques subterrâneos, os hidrocarbonetos migram verticalmente na zona não saturada pela influencia das forças gravitacional e capilar (MARIANO, 2006). As forças dependem da umidade do solo por água ou hidrocarbonetos em fase líquida, as propriedades químicas e físicas dos hidrocarbonetos em fase líquida e as características do solo. O escoamento em meio saturado é sempre bifásico, por apresentar baixa miscibilidade em água (GUIGUER, 2000).

A fase composta pelos hidrocarbonetos chama-se NAPL (*Non Aqueous Phase Liquid* – Fase Líquida Não Aquosa) e existem dois tipos, de acordo com a densidade (MARIANO, 2006): LNAPL (*Light Non Aqueous Phase Liquid* – Fase Líquida Não Aquosa Leve) e possui densidade menor do que a água. Esses hidrocarbonetos estão associados à produção, refino e distribuição de produtos do petróleo, como gasolina, óleo diesel e querosene. DNAPL (*Dense Non Aqueous Phase Liquid* – Fase Líquida Não Aquosa Densa), caracterizada por ter maior densidade do que a água, são os hidrocarbonetos relacionados às atividades industriais, como antraceno, pireno e fenol.

O transporte dos hidrocarbonetos no solo é formado por quatro fases distintas que regulam o processo de migração: fase líquida residual, fase líquida livre, fase dissolvida e fase vapor. A fase líquida residual pode existir no solo como resíduos praticamente imóveis, adsorvidos ou retidos entre os sólidos do solo. A fase líquida não residual, ou a fase líquida livre, é assim chamada, pois quando atinge o nível de água subterrâneo, passa a flutuar sobre ele. A fase dissolvida tem a presença de hidrocarbonetos na superfície sólida do solo, formando películas, que quando atingem o nível de água subterrâneo, formam a pluma de contaminação. Na fase de vapor, os hidrocarbonetos

podem existir como componentes do vapor do solo e se condensam ou são adsorvidos na superfície sólida ou da água (GUIGUER, 2000).

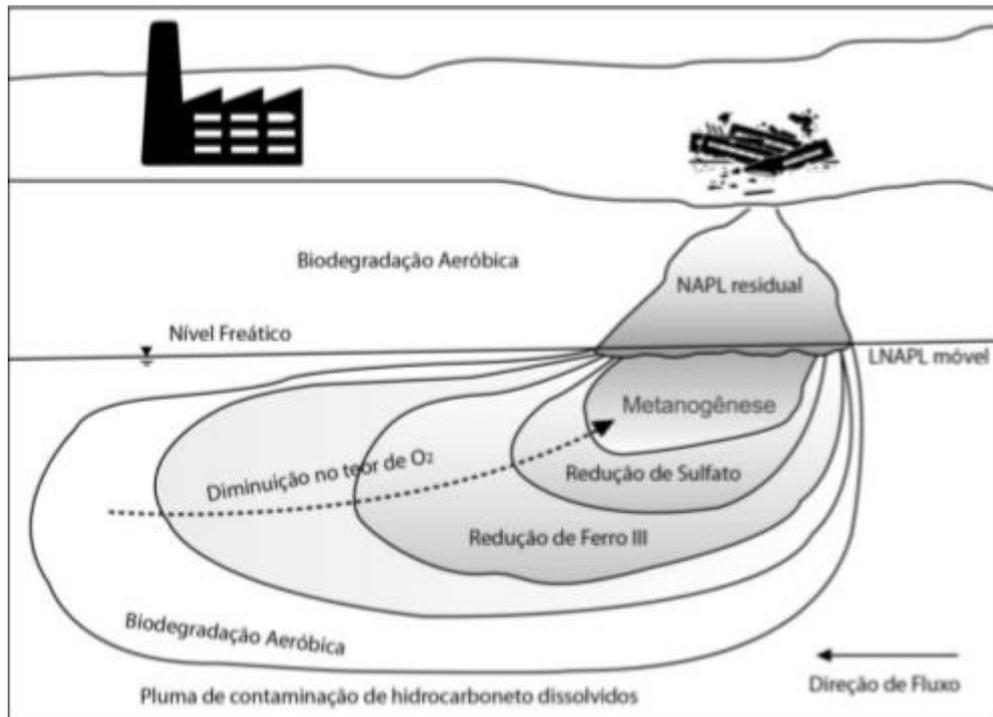
A biodegradação é o principal mecanismo de atenuação natural de contaminantes nos solos e nas águas subterrâneas, em que os micro-organismos modificam os hidrocarbonetos em compostos orgânicos ou permitem a ocorrência da mineralização, que é sua oxidação completa. A grande geração dos compostos orgânicos causa a dissolução mineral e a liberação de íons para a zona saturada (MOREIRA *et al.*, 2006). Ainda, a modificação é limitada pela disponibilidade de receptores de elétrons e hidrocarbonetos, que assumem um papel de doadores de elétrons no processo de degradação, que precisam estar acessíveis bioquimicamente para os micro-organismos. Outros parâmetros importantes para a biodegradação são pH, temperatura, salinidade e potencial redox (FOGHT, 2008).

Em condições aeróbicas, a biodegradação é mais efetiva pelo oxigênio ser o receptor de elétron, o que proporciona a degradação completa dos hidrocarbonetos em produtos não tóxicos, como gás carbônico e água. A disponibilidade de oxigênio é condicionada ao fluxo das águas subterrâneas, de forma que ambientes anaeróbios podem se manifestar. Nesse caso, os micro-organismos utilizam o nitrato, o ferro (III), o sulfato, o manganês (IV) ou o dióxido de carbono como receptores de elétrons. Assim, a biodegradação depende da renovação dos íons no ambiente subterrâneo (DAY *et al.*, 2000).

O início da degradação decorre das zonas periféricas da pluma, já que grandes concentrações de contaminante faz com que o ambiente se torne desfavorável para o desenvolvimento de micro-organismos (RABUS & HEIDER, 1998). Na ausência de oxigênio, há um caminho preferencial de degradação, como mostra a Figura 5.1.

Os trabalhos de aplicação geofísica na contaminação de hidrocarbonetos descrevem uma relação entre áreas de baixa resistividade e estágios avançados de degradação natural dos compostos. A diminuição da resistividade do ambiente geológico é relacionada à quebra das cadeias de hidrocarbonetos e às liberações por processos de oxidação, dispersão e biodegradação. Assim, o resultado pode ocorrer em resposta aos processos de biodegradação dos contaminantes em fase residual, contidos na zona insaturada (SAUCK, 2000; ABDEL AAL *et al.*, 2004; ATEKWANA & ATEKWANA, 2010). Esses processos permitiram o rompimento de correntes de hidrocarbonetos, tendo como consequência a diminuição na resistividade elétrica.

Figura 5.1: Esquema de degradação de hidrocarbonetos.



Fonte: Adaptado de RABUS & HEIDER, 1998

5.2 Diagnóstico de Áreas Contaminadas

O diagnóstico de uma área contaminada começa por uma caracterização do local, a identificação tridimensional da massa do contaminante e a correspondência entre sua distribuição e as condições químicas e microbiológicas da área (BARCELONA, 2000). O monitoramento em longo prazo deve ser contínuo durante todo o ciclo de remediação.

De acordo com o manual de gerenciamento de áreas contaminadas da CETESB (2001), dados sobre o local e o tipo de contaminante devem ser coletados a fim de prever e definir a propagação da pluma e identificar os riscos do impacto. Primeiro, é feita uma investigação preliminar e em seguida, a avaliação confirmatória, o diagnóstico e a remediação.

As técnicas de investigação podem ser através de métodos diretos, como sondagens e amostragens de solo e água, e métodos indiretos, como as ferramentas da geofísica e medidores de gases voláteis. Os primeiros medem com precisão a concentração do composto presente nas amostras coletadas, no entanto, são métodos invasivos, caros e

sua verificação lateral e espacial da área não é tão abrangente. A geofísica é utilizada não apenas no diagnóstico de áreas contaminadas, mas em vários estudos ambientais.

Assim como o diagnóstico é importante, as alternativas de recuperação da área contaminada também são, seja por meio da remoção ou contenção do material, o que dificulta o transporte, ou eliminando o potencial tóxico do contaminante (SCHMIDT, 2010). A técnica apropriada para isto depende das características do contaminante e do local afetado.

6 MATERIAIS E MÉTODOS

6.1 Geofísica

Inicialmente aplicados com o objetivo principal de prospecção mineral e mapeamento de rochas e estruturas, os métodos geofísicos são muito utilizados em estudos ambientais com pesquisas relacionadas à hidrogeologia, para detectar aquíferos, e também para investigação de contaminantes no solo e em águas subterrâneas (MUSSETT & KHAN, 2009). Eles são classificados de acordo com o tipo de propriedade física estudada e podem ser divididos em métodos geoeletricos, sísmicos, potenciais e geotérmicos e nucleares (SHERIFF, 1989). A grande variedade dos métodos permite o uso da geofísica nos diversos campos de pesquisa dentro das geociências: hidrogeologia, geologia ambiental, engenharia civil e ambiental, prospecção mineral, entre outros. Uma das principais vantagens da aplicação dos métodos geofísicos quando comparados aos métodos diretos de investigação de subsuperfície por meio de amostragem é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente menor. E também, diferentemente de amostras pontuais, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais (SHARMA, 2002).

Um dos métodos geofísicos aplicado em pesquisas de investigação do subsolo é o método da Eletrorresistividade, que tem fundamento na Lei de Ohm e utiliza-se da resistividade elétrica para investigar a subsuperfície, que mede a dificuldade que a corrente elétrica encontra para sua passagem em um dado material (MILSON & ERIKSEN, 2011).

O método pode ser aplicado em estudos ambientais porque é sensível às variações de resistividade elétrica dos diferentes componentes do meio. Assim, a resistividade elétrica pode indicar corpos muito condutores (apresentando baixa resistividade) ou isolantes (com resistividade elevada), com campo de aplicação variando desde o conteúdo mineral do solo, a presença de compostos na água e a produção de gás. Essa investigação da subsuperfície através da passagem de corrente elétrica no solo produz um potencial elétrico (ΔV) que é captado por meio de um circuito receptor que permite a medição e análise do parâmetro.

De acordo com Sharma (2002), a propriedade da resistência elétrica de um material é expressa em termos de sua resistividade. Se a resistência entre faces opostas de um corpo condutor de comprimento unitário (L) e área da seção transversal (A) é R , a resistividade (ρ) é representada pela equação 1:

$$\rho = \frac{R.A}{l} \Omega.m \quad (\text{Equação 1})$$

Em que resistividade é expressa em $\Omega.m$ (ohm.metro). Para melhor entendimento do método, é possível basear a teoria em um circuito elétrico simples, no qual o meio físico de subsuperfície age como um resistor.

Segundo Halliday *et al.* (1993), a relação que estabelece a associação entre a resistência elétrica de um determinado material (R), a corrente elétrica que flui pelo mesmo (I) e a diferença de potencial – DDP (Δv) é conhecida como a primeira lei de Ohm, em que:

$$\Delta v = R.I \text{ ou } I = \frac{\Delta v}{R} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

Δv = Diferença de potencial, dada em volt (V);

I = Corrente elétrica dada em ampere (A)

R = Resistência elétrica, dada em ohm (Ω).

Robinson (1988) diz que de acordo com a Equação 1, a lei afirma que o fluxo de corrente elétrica no meio físico é estabelecido a partir da diferença de potencial entre duas extremidades, assim como é inversamente proporcional à resistividade do material.

Usando a relação entre R e ρ (Equação 1), a equação acima pode ser reescrita como:

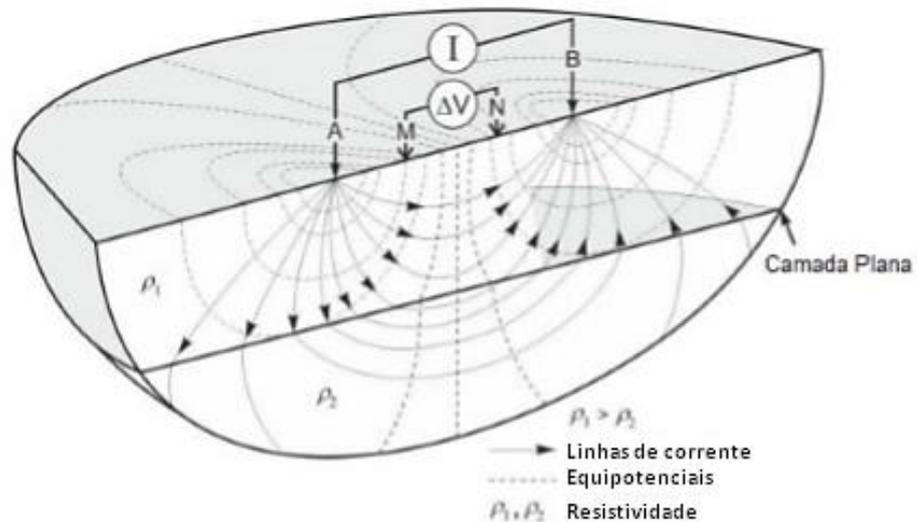
$$\Delta v = \frac{\rho.I}{A} \text{ ou } \rho = \frac{A.\Delta v}{I} \quad (\text{Equação 3})$$

Em um modelo de subsuperfície homogêneo e isotrópico, a diferença de potencial diminui de forma radial conforme a distância da fonte, de modo a constituir superfícies semi-esféricas concêntricas com o mesmo valor de potencial. As linhas de fluxo de corrente são estabelecidas em direções perpendiculares às superfícies equipotenciais, no sentido do maior para o menor potencial elétrico (ROBINSON, 1988).

Assim, os principais métodos geoeletricos constam de quatro eletrodos em contato galvânico com o solo em que o par de eletrodos (AB) é utilizado para emissão de corrente elétrica no subsolo e outro par de eletrodos (MN) é usado para as medições de diferença de potencial (Δv) causado pela passagem da corrente (MUSSET & KHAN, 2009).

A Figura 6.1 representa o conceito básico da medição da resistividade, com linhas de fluxo de corrente entre os eletrodos A e B e linhas equipotenciais posicionadas perpendiculares às mesmas.

Figura 6.1: Princípio da eletrorresistividade



Fonte: Adaptado de Knödel *et al.*, 2007

O método é baseado na introdução de uma corrente elétrica no subsolo de forma a propagar a mesma em diferentes profundidades de investigação, com o objetivo de calcular as resistividades dos objetos de estudo. Os dados obtidos em campo são expressos em valores de resistividade aparente (que retrata uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras) expressos em Ohm.metro ($\Omega.m$) (MILSON & ERIKSEN, 2011). Com o registro dos valores de corrente (I) e da diferença de potencial (Δv), é possível determinar resistividade do meio investigado a partir de:

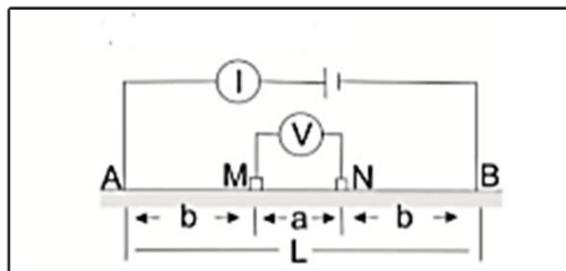
$$\rho a = \frac{K \cdot \Delta v}{I} \quad (\Omega.m) \quad \text{(Equação 4)}$$

Onde:

$$K = \text{fator geométrico}$$

O cálculo da resistência consiste na multiplicação da resistência aparente pelo fator geométrico (K), na qual depende da disposição geométrica dos eletrodos de corrente (A e B) e potencial (M e N), ou seja, do conjunto total de espaçamentos dos eletrodos e do tipo de arranjo utilizado. Os arranjos mais comuns são: Dipolo-Dipolo, Wenner e Schlumberger, sendo este último adotado para a aquisição de dados deste trabalho. O esquema do arranjo pode ser observado na Figura 6.2.

Figura 6.2: Esquema do arranjo Schlumberger.



Fonte: KNÖDEL *et al.*, 2007

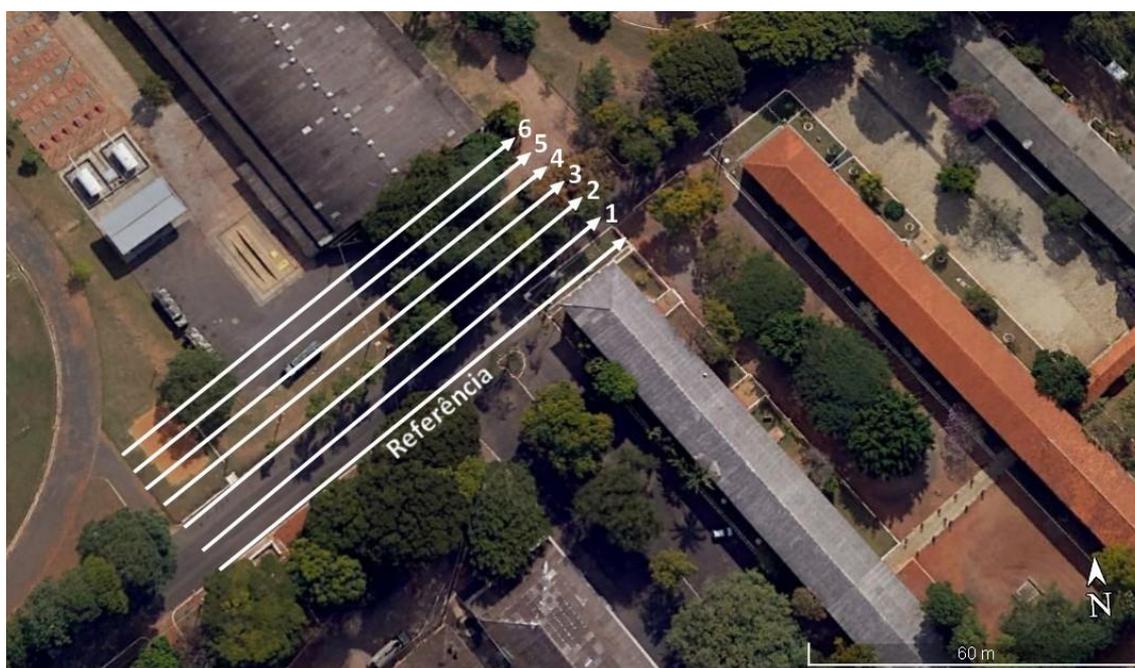
Para uma disposição simétrica de eletrodos, o fator geométrico K pode ser obtido a partir da Equação 5:

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{AM}\right) - \left(\frac{1}{AN}\right) - \left(\frac{1}{BM}\right) - \left(\frac{1}{BN}\right)\right]} \quad (\text{Equação 5})$$

7 AQUISIÇÃO DE DADOS

O trabalho pode ser realizado através de três etapas, sendo estas: estudo bibliográfico, o levantamento geofísico de aproximadamente 1800 m² de malha e a análise dos dados para gerar a presente monografia. Abaixo na Figura 7.1, mostra o esquema de linhas feito na área de estudos.

Figura 7.1: Esquema da distribuição das linhas de Tomografia Elétrica



Fonte: Modificado do Google Earth

Os dados geofísicos são representados por sete linhas de Tomografia Elétrica (TE), que possui aplicabilidade para a investigação de estruturas 2D e permite uma boa visualização do contraste lateral das medidas obtidas em relação às condições naturais do meio, a partir do parâmetro físico de resistividade. Esta técnica é baseada na utilização de arranjos de eletrodos (de corrente e de potencial), mantidos a uma separação pré-definida e deslocados ao longo do perfil desejado, resultando na geração de uma seção horizontal de resistividade por profundidade.

Cada uma das linhas possui 50 m de comprimento em arranjo Schlumberger. Os eletrodos são espaçados entre si a uma distância de 2,5 m, sendo que a distância entre linhas é de 5 m.

Os eletrodos são presos a garras, que são conectados ao cabo, que por sua vez, conectados a bateria e ao resistivímetro. A linha de referência foi feita onde o solo é livre de contaminação, local indicado na figura acima. Dessa forma, é possível a comparação do estado dos solos. A Figura 7.2 mostra o caminhamento elétrico feito no local do antigo posto.

Figura 7.2: Disposição da linha na área contaminada do antigo posto de abastecimento.



Fonte: Autoria própria

As linhas estão aproximadamente a uma distância de 30 m do posto de abastecimento atual do quartel de forma que sua proximidade não demonstra relevância à impureza da área, ilustrado na Figura 7.3.

O resistivímetro, juntamente com todos os outros materiais, foi usado para medir a resistividade do solo, ou seja, sua resistividade para detectar a caracterização da pluma. (Figura 7.4).

Figura 7.3: Tomografia elétrica a cerca de 30 m do posto de abastecimento atual.



Fonte: Autoria própria

Figura 7.4: Resistivímetro.



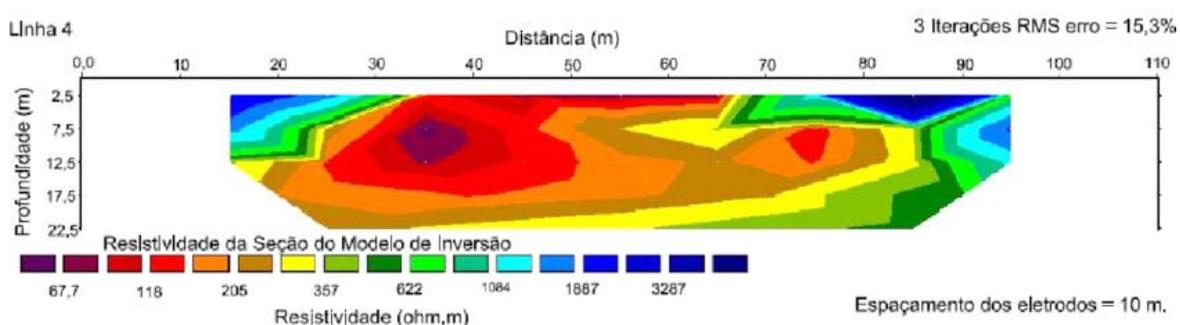
Fonte: Autoria própria

Os produtos obtidos são denominados pseudo-seções e possuem uma distribuição de resistividade elétrica, não refletindo as verdadeiras características, posições e geometrias das estruturas do meio investigado (FACHIN, 2007, GANDOLFO, 2007).

Assim, é necessário um processo de inversão dos dados para buscar um modelo provável de distribuição real dos valores em subsuperfície que garantem informação com maior qualidade.

Ajustes são realizados a partir de informações de espaçamento entre os eletrodos e o tipo de arranjo escolhido para a aquisição. Os dados geofísicos adquiridos foram processados e modelados no programa RES2DINV – Geotomo Software (GEOTOMO, 2004), e são apresentados sob a forma de modelo de inversão em seções com distância e profundidade, com intervalo de interpolação, com valores convertidos em cores e escala gráfica em razão logarítmica (Figura 7.5).

Figura 7.5: Interface do software RES2DINV de um trabalho em um sítio contaminado por lubrificantes.



Fonte: PENNER et al. (2008).

Para um ajuste de qualidade, o *software* ajusta o parâmetro de interesse em seções e aperfeiçoa o método pela redução da diferença entre a medição aparente até que o número de iterações seja suficiente para o erro máximo desejado (qualidade do ajuste expresso pelo RMS – *Root Mean Squared*) seja alcançado (BANIA & CWIKLIK, 2013, LOKE & BAKER, 1996). As iterações são realizadas até que o desvio RMS da última iteração seja semelhante do modelo da iteração anterior.

Para a geração dos modelos de visualização 3D, é feita uma interpolação dos dados do modelo 2D de inversão pela plataforma Oasis Montaj (Geosoft), que é condicionada ao espaçamento entre os eletrodos e quantidade de valores de resistividade aparente amostrados, definido a partir de critérios estatísticos (CAVALLARI, 2017). Assim, cada ponto do modelo 3D final é transformado num bloco, de forma a serem seccionados em níveis definidos para a geração dos mapas de profundidade, em que cada nível é chamado de *slice*.

8 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados são apresentados pela forma de modelos de inversão, processados pelo *software* RES2DINV, que consistem em uma seção distância por profundidade, representando a variação do parâmetro da resistividade elétrica em escala numérica e de cores (Figura 8.1 e Figura 8.2). O modelo 2D utilizado no programa representa a pseudo-seção pelo ajuste das medidas de campo, que procura reduzir a diferença entre os valores de resistividade aparente, calculados e medidos em campo, pelo ajuste da resistividade do modelo, cuja diferença é expressa pelo erro RMS (Root Mean Squared) (LOKE & BARKER, 1996).

Os modelos de inversão foram padronizados em uma única escala de valores e cores, de forma que a análise comparativa entre as linhas fosse possível. Os dados mostram uma variação máxima de 10 Ω .m e 3000 Ω .m.

A linha 1 apresenta valores altos de resistividade na superfície com uma pequena zona de resistividade intermediária em maiores profundidades. A alta resistividade da superfície é oriunda do solo arenoso do Grupo Itararé, enquanto que os valores intermediários são da existência de um aquífero na área. Os valores de resistividade deste nível são compatíveis com as áreas de seca e solo arenoso, relatado em Atekwana *et al.* (2000), onde há valores de resistividade similares.

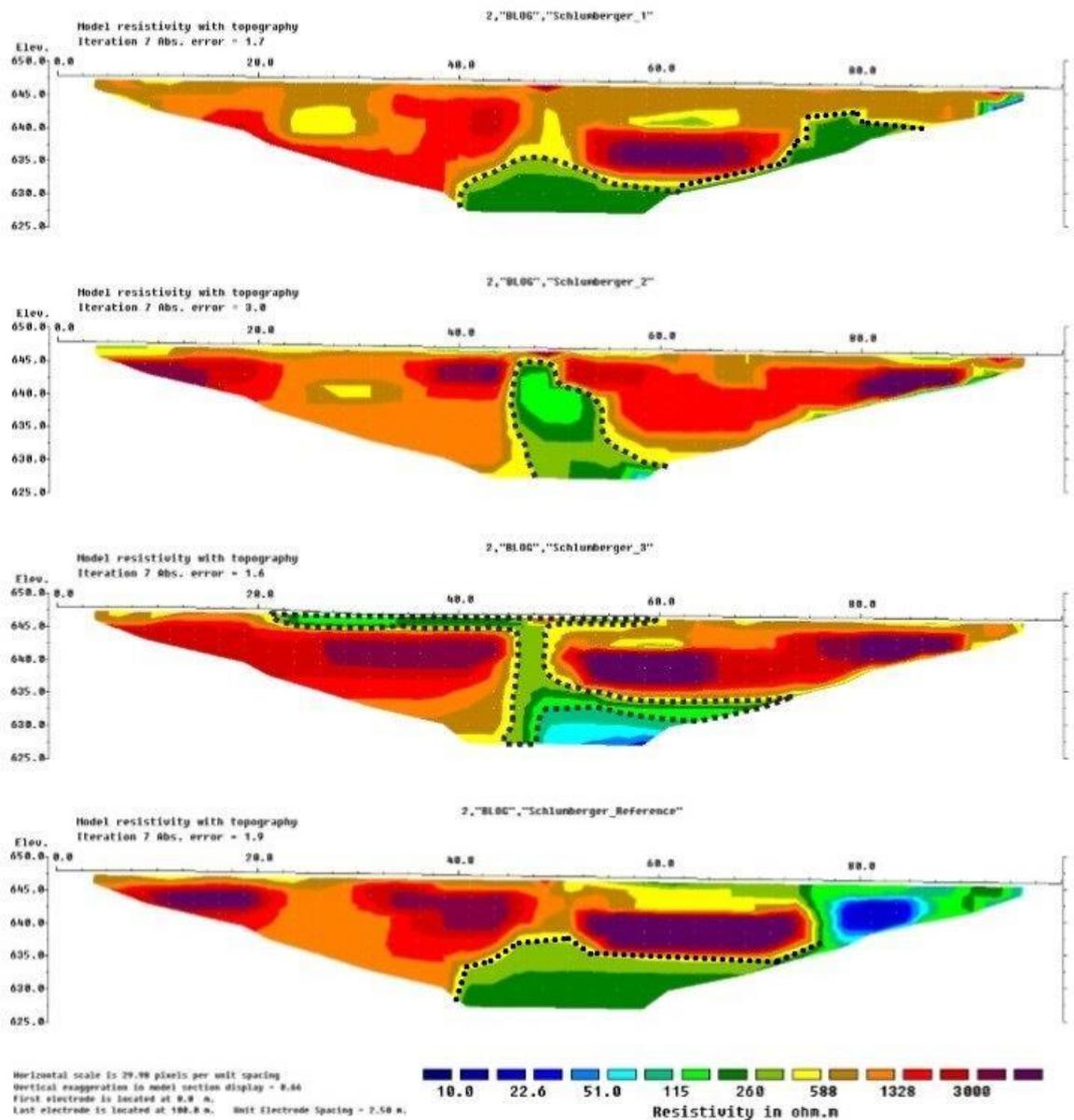
Na linha 2 tem uma atenuação da anomalia descrita na linha 1, com valores inferiores a 260 Ω .m entre 50 m e 60m, próximos a superfície. A área pontilhada ilustrada na Figura 8.1, indicativo da existência de fase residual e dissolvida.

A linha 3 apresenta uma maior anomalia, com valores inferiores a 260 Ω .m e 115 Ω .m. Esta área de resistividade intermediária representa uma continuidade lateral da anomalia descrita na linha 2 e linha 1, e ainda ocorre próximo a superfície, entre 20 m e 75 m.

A anomalia ainda é presente na linha 4. A alta resistividade que deveria estar predominante em superfície mostra um grande contraste com a zona intermediária, denotando a contaminação. As resistividades baixas, denotadas em azul, de valores entre 51 Ω .m e 22 Ω .m, pouco expressivas na linha 4, representam parte de uma área com degradação em estágio avançado, que se repetem nas linhas 5 e 6 com uma maior abrangência entre 50 m e 80 m, vistas na Figura 8.2.

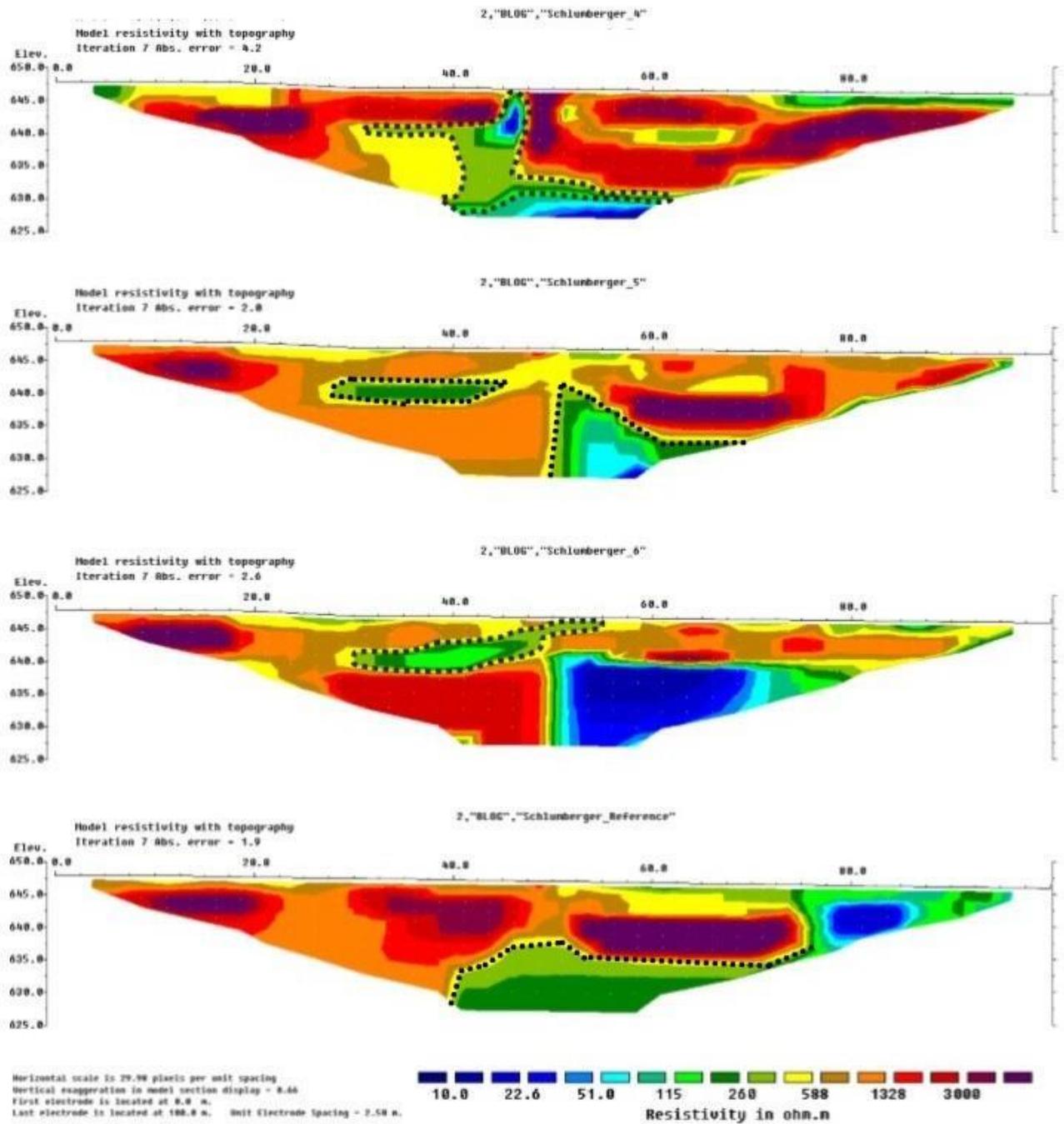
A linha de referência indica o padrão natural da área, com valores de resistividades altas na superfície, porém com uma anomalia destacada em profundidade. Há uma gradação natural da resistividade da área, característica do Grupo Itararé, em que a área destacada, que indica a presença de uma fossa, ocorre em profundidade, diferentemente das outras linhas.

Figura 8.1: Modelos de inversão de resistividade das linhas 1, 2, 3 e referência com destaque para as áreas de resistividade intermediária



Fonte: Autoria própria

Figura 8.2: Modelos de inversão de resistividade das linhas 4, 5, 6 e referência com destaque para as áreas de resistividade intermediária



Fonte: Aatoria própria

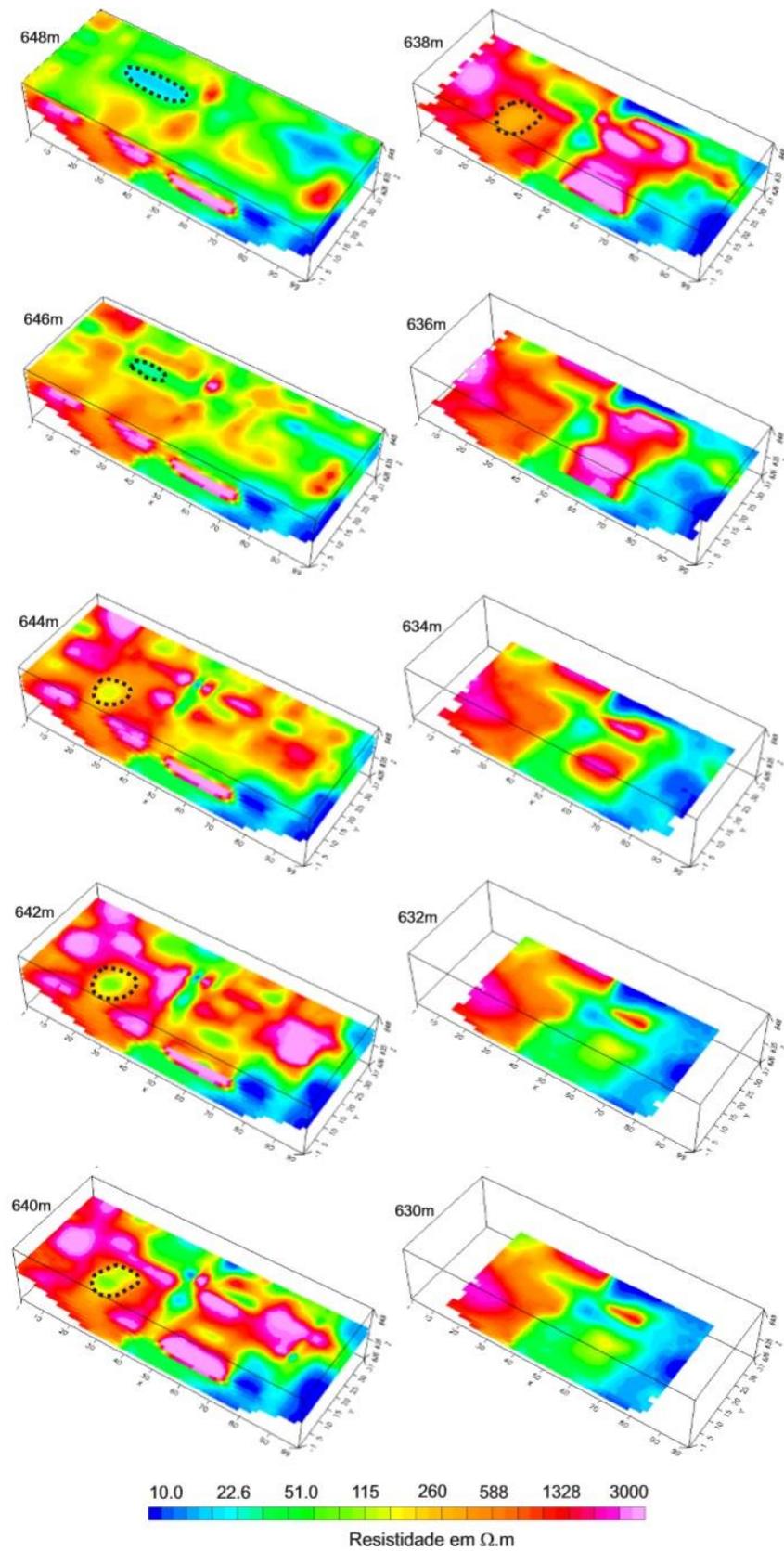
Os mapas de profundidade foram processados pela plataforma Oasis Montaj (Geosoft) apresentados na Figura 8.3, fornecem uma visão geral da distribuição espacial da contaminação por óleo diesel. A análise dos mapas revela uma variação de cores quentes e frias, tendo altos valores de resistividade em praticamente todos os níveis

analisados. A homogeneidade desses valores, tanto em profundidade como lateralmente, possivelmente refletem as condições naturais da área. As linhas de 1 a 6 foram usadas para fazer a interpolação dos blocos.

Foram analisadas as profundidades dos intervalos de 630 m e 640 m. Apesar do padrão geral de alta resistividade ($3.000 \Omega.m$), valores de baixa resistividade ($10 \Omega.m$) também ocorrem.

Nos mapa de profundidade de intervalo 638 m a 648 m, as zonas de baixa resistividade foram destacadas com valores em torno de $115 \Omega.m$ a $22 \Omega.m$: uma anomalia que indica onde o tanque de armazenamento estava enterrado, e a consequente contaminação do local.

Figura 8.3: Mapas de profundidade de resistividade com a zona contaminada em destaque para área pontilhada, sendo esta a provável localização do tanque.



Fonte: Autoria própria

9 DISCUSSÃO

De acordo com a interpretação da tomografia, levando em consideração as comparações das demais linhas com a linha de referência, os valores abaixo de 260 $\Omega.m$ próximos a superfície indicam a contaminação pelo óleo diesel. A presença dos mesmos em profundidade indica a presença de um aquífero.

As linhas 2, 3 e 4 cruzam a área de maior concentração de hidrocarbonetos em fase residual e pode indicar que o posto de abastecimento ficava em cima dessas linhas, ou próximo. A proximidade da resistividade intermediária (entre 260 $\Omega.m$ e 500 $\Omega.m$) na superfície indica a contaminação pelo óleo. As grandes quantidades de óleo vazado e o solo arenoso permitiram a infiltração do contaminante nas outras camadas do solo, que seguiu o fluxo subterrâneo atingindo tanto a superfície quanto as topografias mais baixas.

O posicionamento da linha 4 na área, com relativa queda nos valores de resistividade em profundidade podem indicar a ação de processos de degradação de hidrocarbonetos em fase residual de forma mais acentuada. O centro da contaminação é um ambiente hostil para os microrganismos, e as altas concentrações impedem o seu desenvolvimento e por consequência, ocorre a degradação dos hidrocarbonetos.

Os padrões de resistividade (menores do que 50 $\Omega.m$), que caracterizam as linhas 5 e 6 são indicativos da ação crescentemente intensiva de processos de degradação de fase residual, diante da queda nos valores de resistividade. Esta queda gradativa da resistividade pode indicar ainda a conversão mais efetiva de fase residual em fase dissolvida, além do gradativo retorno às condições naturais da área mediante o consumo dos hidrocarbonetos por ação de processos de atenuação natural.

A linha de referência, que indica o padrão natural do solo, ainda apresenta traços anômalos, mas por estarem em profundidade, não representam a área contaminada pelo óleo diesel. Os valores de resistividades menores do que 51 $\Omega.m$ são oriundos da presença de uma fossa e os valores intermediários, da presença de um aquífero. No entanto, sua comparação com as outras linhas ainda é válida, já que o que caracteriza a contaminação é sua ocorrência em superfície.

10 CONCLUSÃO

Acidentes por meio de vazamentos de tanques corroídos são, infelizmente, comuns, pela duração do material de armazenamento e pelo tempo em que o óleo foi acondicionado no quartel. Em casos de não conformidade durante seu compartimento, os acidentes resultam em grandes vazamentos e por consequência, grande impacto ambiental.

O levantamento geofísico atrelado ao histórico do acidente da área permitiu o esclarecimento do atual estado de contaminação. Ainda, foi possível a identificação e a interpretação das fases residuais e dissolvidas através do método da Tomografia Elétrica, diante os contrastes do ambiente não contaminado. Os dados integrados de resistividade elétrica mostram um padrão de algumas áreas de baixa resistividade (abaixo de $51 \Omega.m$), de estágio avançado de degradação. As zonas de valores intermediários (entre $260 \Omega.m$ e $500 \Omega.m$) indicam fase dissolvida e residual em baixos teores, portanto, a contaminação da área quando localizada em superfície.

A interpretação dos dados geofísicos possibilitou um diagnóstico amplo e efetivo para compreensão da atual situação da área contaminada, além de possibilitar a identificação de locais prioritários para ações de remediação, algo extremamente difícil somente a partir de análises químicas da água subterrânea. Diante deste cenário, a geofísica é uma alternativa que complementa os estudos geoquímicos, sendo ambos muito importantes num diagnóstico integrado e vasto.

Além disso, os resultados deste estudo podem contribuir para o diagnóstico geofísico em áreas semelhantes através da eficácia do uso da tomografia elétrica pelos modelos de inversão e os pseudo-3D, os quais permitiram uma análise qualitativa do estado de contaminação atual.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL AAL, Gamal Z. et al. Effects of microbial processes on electrolytic and interfacial electrical properties of unconsolidated sediments. *Geophysical Research Letters*, v. 31, n. 12, 2004.

ATEKWANA EA & ATEKWANA EA. Geophysical Signatures of Microbial Activity at hydrocarbon Contaminated Sites: A Review. *Surveys Geophysics*,31:247–283. 2010

ATEKWANA EA, SAUCKWA & WERKEMA JRDD. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 44:167–180. 2000

BARCELONA, M. J. Role of Redox Processes and Spatial and Temporal Variability in Site Characterization. In: *Workshop on Monitoring Oxidation-Reduction Processes for Groundwater Restoration*, Dallas, Texas. 2000

BANIA, G.; CWIKLIK, M. 2D Electrical Resistivity Tomography interpretation ambiguity – example of field studies supported with analogue and numerical modelling. *Geology, Geophysics & Environment*. Vol. 39. nº 4. P.331-339. 2013

BENSON RC, GLACCUM RA & NOEL MR. Geophysical techniques for sensing buried wastes and waste migration. U.S.Environmental Protection Agency, Las Vegas, Nevada, 236p. 1982

BISTRICHI, C.A. Análise Estratigráfica e Geomorfológica do Cenozóico da Região de Atibaia-Bragança Paulista, do de São Paulo. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, 160 p. 2001

CAMPINAS (Plano Diretor). Caderno de Subsídios. Secretaria Municipal de Planejamento, Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Campinas/SP, 2006.

CAMPOS, H.C.N.S. Caracterização e cartografia das províncias hidrogeoquímicas do estado de São Paulo. São Paulo. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 176 p. 1993

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Secretaria do Meio Ambiente. Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas. São Paulo, 2001.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Ferrobán-Ferrovias Bandeirantes S.A. Investigação complementar para avaliação de risco na área atingida por vazamento de combustíveis. São Manuel – SP, 2006.

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Ferrobán-Ferrovias Bandeirantes S.A. Monitoramento Hidrogeológico. São Manuel – SP, 2010.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução no 273/00, 2000. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama/res/res00/res27300.html. Acesso em: mar. 2019

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução no 420/09, 2009, Disponível em: <http://www.vigilanciasanitaria.sc.gov.br/index.php/download/category/247-vigisolo?download=1248:apresentacao-definicoes-resolucao-conama-n-420-2009> Acesso em: ago. 2019.

CAVALLARI, F; Caracterização geofísica de contaminação por hidrocarbonetos em acidente ferroviário no município de Botucatu - SP / Fernanda Cavallari. - Rio Claro, 2017

CORSEUIL, H. X.; MARINS, M. D. M. Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: O problema é grave? Revista Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 2, n. 2, p. 50-54, 1997.

CUNHA, C. D. *et al.* Biorremediação de água subterrânea contaminada com gasolina e análise molecular da comunidade bacteriana presente. Rio de Janeiro, RJ: CETEM/MCT, 2008. 9.

D'AGOSTINHO, A. Estudo preliminar do comportamento de Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) em solo por isotermas de sorção. Dissertação (Mestrado em Ciências na Área de Tecnologia Nuclear-Materiais). Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. Universidade de São Paulo, 2004.

DAY, M.J.; REINKE R.F.; THOMSON J.A.M. Fate and transport of fuel components (including MTBE) below slightly leaking underground storage tanks in ground water: prevention, detection & remediation conference and exposition. Special focus:natural attenuation and gasoline oxygenates. National Ground Water Association, Anaheim California, p. 296-305, 2000.

FACHIN, S.J.S. Ensaios geoeletricos 2D no antigo lixão de Ribeirão Preto-SP: Avaliação de parâmetros de aquisição e monitoramento ambiental de problema. 2007. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Departamento de Geofísica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

FATORELLI, L. Proposta de avaliação de risco ecológico para contaminações de petróleo e derivados – estudo de caso. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.

FERNANDES, A. J. e MELLO, C. L. - Coberturas cenozoicas e estruturas deformadoras na depressão periférica paulista, Campinas, São Paulo- Revista do Instituto Geológico, São Paulo, 25(1/2), 49-66, 2004.

FOGHT J, Anaerobic Biodegradation of Aromatic Hydrocarbons: Pathways and Prospects. J Mol Microbiol Biotechnol 2008, 15:93-120. doi: 10.1159/000121324. Acesso ago. 2019.

FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E. Estratigrafia, ambiente deposicional e análise de reservatório do Grupo Itararé (Permocarbonífero), Bacia do Paraná (parte 1). Boletim de Geociências da Petrobrás, vol. 2, n° 2/4, p. 147-191, 1988.

FRANÇA, A. B. & POTTER, P. E. Stratigraphy and reservoir potential of glacial deposits of Itararé Group (Carboniferous-Permian), Paraná Basin, Brazil. American Association of Petroleum Geologists Bulletin, vol. 75, p. 62-85, 1991.

GANDOLFO, O.C.B. Um estudo do imageamento geoeétrico na investigação rasa. São Paulo, Tese (Doutorado em Geociências) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 215 p. 2007.

GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV (v.3.54) and RES3DINV (v.2.14) for Windows 98/ME/2000/NT/XP. Geoelectrical Imaging 2D & 3D. 130p. 2004.

GUIGUER, N. Dissolution and mass transfer processes for residual organics in the saturated groundwater zone: Numerical modelling, Ph.D. thesis, Dep. of Earth Sci., Univ. of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1993.

GUIGUER, N. Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento. Waterloo Hydrogeologic, Inc. 356p. 2000.

HALLIDAY, D.; RESNICK, R.; WALKER, J. Fundamentos de Física. 4. ed. Wiley & Sons, Inc., 1993.

INSTITUTO GEOLÓGICO. Subsídios do meio físico-geológico ao planejamento do município de Campinas (SP). São Paulo. Relatório Técnico IG, 3 v. 1993.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. Roteiro Orientativo para Delimitação de Perímetro de Proteção de Poço. 1ª ed. São Paulo, SMA, IMESP. 60p. 2010.

IRITANI, M.A.; EZAKI, S. As águas subterrâneas do estado de São Paulo. Secretaria do meio ambiente, Instituto Geológico. 3ª Ed. São Paulo. 104 p. 2012.

KNÖDEL, K.; LANGE, G.; VOIGH, H. J. Environmental Geology – Handbook of fields methods and case studies. [S.l.]: Springer, 1357 p. 2007

KULKAMP, S. M. Atenuação natural de hidrocarbonetos de petróleo em um aquífero contaminado com derramamento simultâneo de óleo diesel e etanol. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2003.

LABUD, V., GARCIA, C., HERNANDEZ, T. Effect of hydrocarbon pollution on the microbial properties of a sandy and a clay soil. Chemosphere, , v.66, p.1863-1871. 2007

LEINZ, V. Estudos sobre a glaciação carbonífera no sul do Brasil. Boletim DNPM/DFPM, Rio de Janeiro, v. 21, p. 1-47, 1937.

LOKE MH. Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys. 127pp. 2002

LOKE, M. H. & BARKER, R. D. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. Geophysical Prospecting, 44, p.131-152. 1996

MARIANO, A. P. Avaliação do potencial de biorremediação de solos e de águas subterrâneas contaminados com óleo diesel. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Geociências e Meio Ambiente, Universidade Estadual Paulista. Rio Claro-SP, 2006.

MELO, M.S.; COIMBRA, M.; CUCHIERATO, G. Fácies Sedimentares da Formação Rio Claro, no Cenozóico da Depressão Periférica Paulista. Revista do Instituto Geológico de São Paulo, 18 (½). Janeiro/Dezembro, p 49-63. 1997.

MILSON, J. & ERIKSEN, A. Field Geophysics – The geological field guide series. Chichester: John Wiley & Sons Ltd, 4ª edição, 297 p. 2011.

MOREIRA, C. A.; DOURADO, J. C.; BRAGA, A. C. O., Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. Revista Brasileira de Geofísica, vol. 24(3), p. 383-392, 2006.

MUSSET, A.E. & KHAN, M.A. Looking into the Earth - An Introduction to Geological Geophysics. New York: Cambridge University Press, 493 p. 2009.

NETTO, A. D. P.; ARBILLA, G; FERREIRA, L. F. V.; OLIVEIRA, A. S.; BAREK, J. Química Nova, v.23, n.6, 2000.

OLIVEIRA, E. Geologia e Recursos Minerais do Estado do Paraná. Monografia do Serviço de Geologia e Mineralogia do Departamento Nacional da Produção Mineral, vol. 6, 1927.

PALUDO, D. Intemperização de fontes de contaminação de óleo diesel em águas subterrâneas na presença e ausência de etanol. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.

PENNER C, GIOVANNI & SHULZ, HARRY & ELIS, VAGNER. Avaliação de Sítio Contaminado Usando o Método Geofísico do caminhamento elétrico dipolo-dipolo. 10.13140/2.1.4121.9361. 2008

PETRI, S. Grupo Tubarão. In: Geologia do Estado de São Paulo. Instituto Geográfico e Geológico, São Paulo, v. 41, p. 56-63, 1964.

RABUS R & HEIDER J. Initial reactions of anaerobic metabolism of alkylbenzenes in denitrifying and sulfate-reducing bacteria. Archives of Microbiology, v 170, p. 377–384, 1998.

ROBINSON, E. S. Basic Exploration Geophysics. John Wiley & Sons Inc., 1988

SAUCK, W. A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. Journal of Applied Geophysics, Kalamazoo, vol 44, p.151-165, 2000.

SÃO PAULO - SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO- Instituto Geológico- Subsídios do Meio Físico-Geológico ao Planejamento do Município de Campinas (SP)- Volume II – Relatórios Técnicos – Programa: Cartas Geológicas e Geotécnicas para o Planejamento Ambiental na Região entre Sorocaba e Campinas- São Paulo, 2009.

SHARMA, P. V. Environmental and engineering geophysics. Cambridge University Press, 500 p. 2002

SCHMIDT, C.A.B. Remediação in situ de solos e água subterrâneas contaminados por líquidos orgânicos não miscíveis em água (NAPLs). Coletânea em Saneamento Ambiental – Série Resíduos Sólidos e Geotecnia Ambiental, Volume 1. Universidade do Estado do Rio de Janeiro. 2010.

SCHIRMER, W. N. Amostragem, análise e proposta de tratamento de compostos orgânicos voláteis (COV) e odorantes em estação de despejos industriais de refinaria de petróleo. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Santa Catarina, 140p. 2004.

SCHNEIDER, R.L.; MUHLMANN, H.; TOMMASI, E.; MEDEIROS, R.A.; DAEMON, R.F. & NOGUEIRA, A. A. Revisão Estratigráfica da Bacia do Paraná. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 28, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre- RS, SBG, vol.1, p. 41- 66. 1974

SHERIFF, R. E. Geophysical Methods. Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989

SENNA, J. ., KAZZUO, C. Mapa Geológico Simplificado do Município de Campinas Geociências Virtual, 24 nov. 2010. Disponível em: <<http://www2.ib.unicamp.br/lte/gv/visualizarMaterial.php?idMaterial=1187>>. Acesso em: jun. 2019.

SUSS, João Filipe et al. O grupo itararé (Neocarbonífero-eopermiano) entre porto amazonas (PR) e mafra (SC): Sedimentação gravitacional em contexto marinho deltaico com influência glacial. Geociências, v. 33, n. 4, p. 701-719, 2014

TELFORD, W. M. W.; GEDART, L. P.; SHERIFF, R. E. Applied Geophysics. London, UK: Cambridge University Press - Second Edition, 792 p. 1990.

VITTE, Antonio Carlos; CISOTTO, Mariana Ferreira; VILELA FILHO, Luiz Ribeiro. A urbanização e a incorporação das várzeas ao espaço urbano de Campinas (SP), Brasil. **Revista Geografar**, v. 5, n. 1, 2010.

YOSHINAGA, Sueli, *et al.* - Subsídios ao planejamento territorial de Campinas: A aplicação da abordagem de tipos de terreno, Revista IG. São Paulo, Volume Especial 1995.

YOSHINAGA-PEREIRA, S.; Silva, A.A.K. Condições de ocorrência das águas subterrâneas e do potencial produtivo dos sistemas aquíferos na região metropolitana de Campinas. Rev. IG, v. 18, n. 1-2, p. 23-40, 1997