

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ÁREA CONTAMINADA POR
HIDROCARBONETOS PROVENIENTES DE POSTO DE GASOLINA DESATIVADO**

Mariana Ramos Ciotta

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2017 / 37)

SÃO PAULO
2017

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

CARACTERIZAÇÃO GEOELÉTRICA DE ÁREA CONTAMINADA POR
HIDROCARBONETOS PROVENIENTES DE POSTO DE GASOLINA DESATIVADO

De acordo

MARIANA RAMOS CIOTTA

Aluna: Mariana Ramos Ciotta


Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-2017/37)

*“Caminhante, não há caminho,
se faz caminho ao andar.”
Antônio Machado*

AGRADECIMENTOS

A todos os professores do Instituto de Geociências que me formaram nesses 5 anos. Todos foram importantes, mas alguns essenciais. Um agradecimento especial àqueles que podem nem saber disso, mas foram inspiradores: Mário Campos, Adriana Alves, e Paulo Giannini.

Ao prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas pela tremenda generosidade em transmitir seus conhecimentos, pela paciência e orientação. Obrigada por me ensinar que o trabalho pode ser algo muito prazeroso, e que trabalhar com o que se ama faz toda a diferença. Eu não poderia ter um orientador melhor.

Aos alunos da disciplina GSA0519 por ajudarem nas coletas do trabalho de campo e no processo de aprendizagem de tratamento de dados. Um grande agradecimento ao Samuca por todos os trabalhos de campo da graduação, sempre nos ajudando com um sorriso enorme no rosto. O Paulinho e o Fernando também ajudaram demais.

A todos meus colegas da Turma 56, em especial àqueles que tornaram essa jornada mais leve. O Pessoal do “Nóis”, pelos anos divertidos. Também meu agradecimento à Xica, Carina, Gari, Porca, Peps, José Guilherme, Murta, Bago e Mãe Louca. Obrigada pelos resumos e noites mal dormidas compartilhadas.

A todos os funcionários do IGc, que tornaram nossa convivência no espaço possível. Motoristas, obrigada pela paciência.

Ao Ricardo, Marcia e Inaê, que me acolheram como uma segunda família em São Paulo. Vocês tornaram esse caminho muito mais feliz.

Ao meu irmão Matheus, que mesmo longe sempre se fez presente. Você é meu orgulho e tenho certeza que vai ser um geólogo melhor que eu.

Ao Theo, que merece uma página inteira de agradecimentos. Obrigada por me aturar durante toda a graduação, e por me ajudar em todos os momentos. Obrigada pelo amor e companheirismo.

Aos meus pais, Mario e Rosana, por me apoiarem nas minhas escolhas de vida. Sem vocês eu não estaria aqui. Pai, mãe: essa é pra vocês.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	1
RESUMO	2
ABSTRACT	3
1. INTRODUÇÃO	4
1.1. Croqui de localização da área estudada	4
2. METAS E OBJETIVOS	5
3. TRABALHOS PRÉVIOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
3.1. Geologia Local e Regional	6
3.2. Contaminação por hidrocarbonetos	7
3.3. Estudos de casos semelhantes e alternativas de remediação	8
4. MATERIAIS E MÉTODOS	10
4.1. Materiais	10
4.2. Métodos	11
4.2.1. Eletorresistividade	12
4.2.2. Processamento de Dados	15
5. RESULTADOS OBTIDOS	15
5.1. Pseudo-seções e seções modeladas	15
5.2. Mapas de resistividade	20
5.3. Modelos tridimensionais (simulações, blocos diagrama)	23
6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	26
6.1. Fotografias das escavações realizadas / presença de tanques	28
7. CONCLUSÕES	29
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Croqui de localização da área estudada, sendo possível observar as linhas utilizadas para a obtenção de medidas.	5
Figura 4.1. Exemplo de resistivímetro utilizado em campo. Extraído de CETESB, 1999.	10
Figura 4.2. Procedimento para a obtenção de dados a partir da técnica SEV.	11
Figura 4.3. Procedimento para a obtenção de dados a partir da técnica CE.	11
Figura 4.4. Ilustração do subsolo heterogêneo e distribuição das resistividades. Extraído de Gallas, 2000.	13
Figura 4.5. Caminhamento Resistividade/Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (Gallas, 2000).	14
Figura 5.1. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha A.	16
Figura 5.2 Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha B.	16
Figura 5.3. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha C.	17
Figura 5.4. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha D.	17
Figura 5.5. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha E.	18
Figura 5.6. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha F.	18
Figura 5.7. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha G.	19
Figura 5.8. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha H.	19
Figura 5.9. Mapa de resistividade modelada do nível 1. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 1,5m.	21
Figura 5.10. Mapa de resistividade modelada do nível 2. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 2,5m.	21
Figura 5.11. Mapa de resistividade modelada do nível 3. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 5m.	22
Figura 5.12. Mapa de resistividade modelada do nível 4. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 7m.	22
Figura 5.13. Mapa de resistividade modelada do nível 1. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 9m.	23
Figura 5.14. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 1.	23
Figura 5.15. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 2.	24
Figura 5.16. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 3.	24
Figura 5.17. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 4.	25
Figura 5.18. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 5.	25
Figura 6.1. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.	28
Figura 6.2. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.	29
Figura 6.3. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.	29

RESUMO

O presente Trabalho de Formatura investigou e interpretou os dados de contaminação de hidrocarbonetos em um posto de gasolina desativado de localização protegida por motivações judiciais. O estudo contou com a aplicação do método da eletrorresistividade, com técnica do caminhamento elétrico e arranjo dipolo-dipolo.

A investigação indireta propiciada pelos métodos geofísicos possibilita estudos mais econômicos e efetivos para a análise de casos de contaminação subterrânea e que irão subsidiar e direcionar as investigações diretas posteriores. O uso da eletrorresistividade para análise de contaminação decorre do fato de que materiais presentes no subsolo apresentam diferentes contrastes de resistividade elétrica.

Dessa maneira, conhecendo-se o comportamento da resistividade das contaminações por hidrocarbonetos, é possível definir sua localização por meio do contraste com o material circundante.

Com os resultados em mãos, é possível observar que os valores de resistividade mais baixos que seu entorno indicaram com precisão a área contaminada e a localização dos tanques de combustíveis enterrados, que já foram localizados. Ademais, nesse trabalho são apresentadas sugestões de remediação.

Palavras Chaves: Eletrorresistividade, contaminação, hidrocarbonetos.

ABSTRACT

The present graduation monograph investigated and interpreted hydrocarbon contamination data at a deactivated gas station protected by judicial motivations. The study counted on the application of the electrorresistivity method, with electrical profiling technique and dipole-dipole arrangement.

Indirect research offered by the geophysical methods enables more effective and economic studies for the analysis of groundwater contamination cases and that will support and direct the subsequent direct investigations. The use of electroresistance for contamination analysis stems from the fact that materials present in the subsoil present different contrasts of electrical resistivity.

Thus, by knowing the behavior of the resistivity of the contaminations by hydrocarbons, it is possible to define its location by means of the contrast with the surrounding material.

With the final results, it is possible to observe that the contaminated area and the location of buried fuel tanks (already located) are indicated by the lower resistivity values. In addition, remediation suggestions are presented in this paper.

Key Words: Electrical Resistivity, Contamination, Hydrocarbons.

1. INTRODUÇÃO

A contaminação de subsolo e águas subterrâneas é um problema no que concerne a toda sociedade, visto que afeta direitos humanos básicos como o direito fundamental de acesso à água potável. Estima-se que cerca de um bilhão de pessoas não tem alcance ao abastecimento de água regular e suficiente e, nesses cenários, a preservação do subsolo e águas subsuperficiais se torna ainda mais relevante (ONU, 2003).

Existem também situações como as da cidades de São Paulo e Los Angeles, onde a necessidade cada vez maior de recursos hídricos encontra como impasse problemas de fornecimento e mesmo ausência de abastecimento disponível para a demanda cada vez crescente (Marengo, 2015; Carle, 2016).

A gestão de áreas contaminadas no Brasil não apresenta grandes avanços desde que o problema começou a ser tratado em escala mundial na década de 1980 (IPT, 2014). A legislação não acompanha a demanda que cresce, sendo que as iniciativas de corporações costumam ocorrer apenas após a intervenção de órgãos ambientais (IPT, 2014). A questão da contaminação proveniente de postos de combustíveis ganha nova luz com o uso dos métodos geofísicos. A possibilidade de se estudar uma pluma de contaminação indiretamente permite que estas sejam bem delimitadas, o que facilita processos de remediação, além de redução de custos.

O presente trabalho compila dados da literatura de diversos casos nos quais o método da eletrorresistividade foi aplicado ao estudo de contaminação de subsolo por hidrocarbonetos. A reunião desses trabalhos permite afirmar que a técnica de caminhamento elétrico é eficiente na localização de plumas de contaminação. Ademais, sugestões de remediação podem ser encontradas.

1.1. Croqui de localização da área estudada

O presente levantamento geofísico foi realizado a pedido de uma concessionária de rodovias do estado de São Paulo, e a localização exata é sigilosa por motivação judicial (principalmente). A figura 1.1. traz uma imagem do Google Earth, sem especificar a localização da área e sem coordenadas, pelas razões já especificadas.

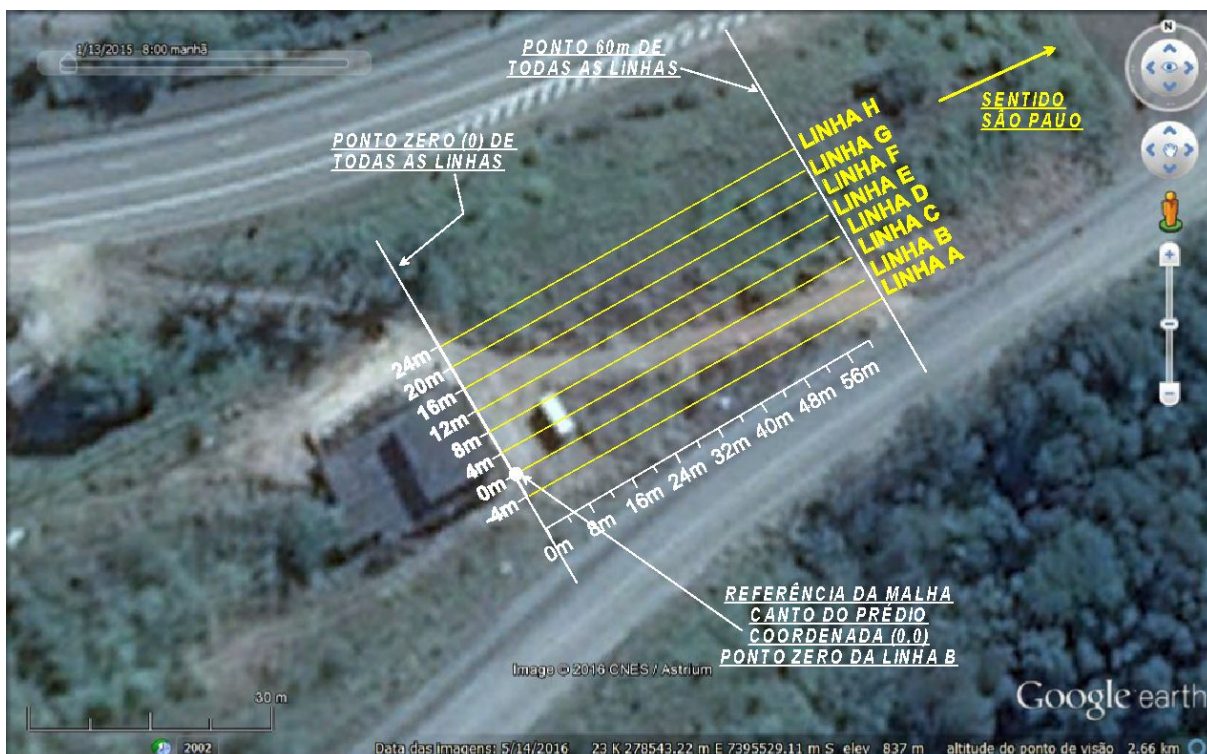


Figura 1.1. Croqui de localização da área estudada, sendo possível observar as linhas utilizadas para a obtenção de medidas.

2. METAS E OBJETIVOS

O interesse central desse trabalho é a caracterização do comportamento de plumas de contaminação de hidrocarbonetos empregando-se métodos geoeletricos. Esses hidrocarbonetos são oriundos de uma contaminação de tanques de um posto de combustíveis desativado. Os levantamentos geofísicos deste trabalho na área possibilitaram a produção de perfis e mapas que dimensionam a extensão da área contaminada, bem como a detecção dos antigos tanques enterrados.

De posse desses resultados é estabelecida a abrangência das áreas contaminadas e a sugestão das remediações posteriores, além da remoção dos tanques.

3. TRABALHOS PRÉVIOS E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A revisão de trabalhos prévios e a compilação bibliográfica permitem analisar a efetividade do método da eletrorresistividade para os casos de contaminação do subsolo por hidrocarbonetos. Dessa maneira, pode-se estudar desde a geologia regional e local da área, passando pelo comportamento dos hidrocarbonetos até estudos de casos semelhantes e alternativas de remediação.

3.1. Geologia Local e Regional

Localmente, na área estudada, foram identificados afloramentos de rochas carbonáticas e gnaisses. Constata-se que o solo é pouco espesso (até no máximo de 10-12m), apresentando constituição areno-siltico-argilosa. Observam-se afloramentos destas rochas razoavelmente extensos e próximos uns dos outros, o que corrobora a pouca espessura de solos no local.

A contaminação restringe-se, conforme indicado pelas investigações diretas posteriores (escavações, aspectos visuais, compostos orgânicos voláteis - VOCs), somente às partes superiores do subsolo, conforme é observado nas fotos 6.1., 6.2. e 6.3.

Desta forma, o aspecto geológico realmente relevante para este tipo de trabalho é o que se refere à constituição do pacote geológico superficial, de cerca de 10-12m. A partir daí tem-se a rocha sã, de natureza ígnea/metamórfica, que é praticamente impermeável, não permitindo que eventuais contaminações se propaguem em profundidade.

Também os resultados dos levantamentos geofísicos mostram que as resistividades mais profundas praticamente não apresentam quedas nas resistividades, o que indica que as contaminações restringem-se às partes mais superficiais do terreno.

A região de estudo se enquadra no contexto do Complexo Cristalino e Grupo São Roque, que afloram nas áreas abrangidas pela Folha de São Roque (Hasui, 1975). O Precambriano Superior marca o início da evolução geológica, e se vincula a processos do Ciclo Brasileiro (Hasui, 1975). A geomorfologia é bastante acidentada, variando entre 1200m e 600m de elevação. O Grupo São Roque se caracteriza pela presença de sequências vulcanossedimentares, cuja deposição se deu provavelmente após o Paleoproterozoico tardio (Henrique-Pinto, 2012). Datações em grãos de monazita (predominantemente equigranular) pela técnica U-Pb evidenciam idades de 2199 ± 8.5 Ma (para a região de Morro Doce) e 2247 ± 13 Ma (para região de Morro do Polvilho) (Henrique-Pinto, 2012). Essas idades, por sua vez, representam as idades da fonte granítica para os metaconglomerados da unidade basal do Grupo São Roque, a Formação Boturana (Henrique-Pinto, 2012).

Ambiente marinho marcado por atividade vulcânica foi sugerido como o ambiente deposicional do Grupo São Roque (Carneiro et al., 1984; Henrique-Pinto e Janasi, 2010). A idade de deposição do Grupo é apontada por método U-Pb (rochas metavulcânicas ácidas e básicas), indicando idades de 1750 ± 40 Ma, idade correspondente à passagem Estateriano-Calimíniano (Oliveira et al., 2008).

Esse Grupo se localiza na Província Estrutural Mantiqueira, sendo parte do Domínio Apiaí-São Roque (Campos Neto, 2000). O Domínio Apiaí-São Roque é um bloco tectônico que se localiza no sudeste do Brasil, mais especificamente entre a Nappe Socorro-Guaxupé a norte e o Domínio Embu a sul (Campos Neto, 2000; Henrique-Pinto et al., 2014).

Sedimentos neo-cenozóicos e recentes recobrem parcialmente o Complexo Cristalino e o Grupo São Roque (Coutinho, 1972). O Complexo Cristalino ocorre por todas as bordas da Bacia de São Paulo, mais especificamente na porção sul do rio Tietê. Suas litologias são marcadas por gnaisses, mica xistos e granitos pegmatíticos. Em menor quantidade notam-se quartzitos e anfibolitos (Coutinho, 1972).

O Grupo São Roque, por sua vez, se constitui de metassedimentos clásticos intercalando-se a anfibolitos. Os metassedimentos são penetrados por corpos graníticos, cuja composição é predominantemente adamelítica (Coutinho, 1972). Os adamelitos correspondem a rochas plutônicas cujos teores de quartzo são superiores a 10%, e o feldspato potássico corresponde entre 40% e 60% do total de feldspatos (Nockolds, 1954). Os corpos graníticos, por sua vez, cobrem mais de 50% da área atribuída ao Grupo São Roque. É possível a ocorrência de pequenas lentes de calcário, assim como quartzitos.

3.2. Contaminação por hidrocarbonetos

O uso dos derivados de petróleo apresenta, em muitos casos, geração de resíduos, cujo armazenamento incorreto pode provocar desastres ambientais. Uma questão ambiental importante da atualidade diz respeito à destinação desses resíduos, considerando que opções de reutilização e descarte adequados muitas vezes são indisponíveis (Moreira e Dourado, 2005). Dessa maneira, pode-se fazer a análise do comportamento dos hidrocarbonetos em subsuperfície, de maneira a se evitar, acompanhar e remediar acidentes. Para tanto, é necessário entender como esses hidrocarbonetos se comportam no subsolo.

Uma classificação geral dos líquidos contaminantes de fase não aquosa (NAPL - nonaqueous phase liquids) baseia-se nas propriedades físicas e químicas destes, que resultam em imiscibilidade com a água. Portanto, é feita a divisão entre líquidos mais leves que a água (LNAPL - light nonaqueous phase liquids) e líquidos mais densos que a água (DNAPL - dense nonaqueous phase liquids) (Newell et al., 1995).

A maioria dos combustíveis apresenta comportamentos equivalentes aos LNAPLs, ou seja, flutua na água (Marques, 2007). Combustíveis como gasolina, diesel, querosene,

óleos lubrificantes e combustíveis pesados são classificados pelo American Petroleum Institute como os principais tipos de LNAPL (API, 2004).

A gasolina brasileira se caracteriza por apresentar, em média, 24% de etanol para diminuir a octanagem e reduzir a emissão de dióxido de carbono, com a finalidade de evitar impactos que possam ocasionar mudanças climáticas globais. Em termos práticos, isso significa que estudos internacionais podem não se aplicar aos resultados esperados em território brasileiro (Marques, 2007). O impacto do etanol, contudo, pode ser maior na questão dos contaminantes em subsuperfície. A presença do etanol associado à gasolina pode aumentar sua solubilidade em água, o que torna a situação de vazamentos de contaminantes potencialmente mais grave (Guiguer, 1996; Courseil e Marins, 1997).

Diesel e gasolina têm em sua composição predominância de cadeias C_{10} a C_{20} , apresentando grande concentração de cicloalcanos e PAHs (Polycyclic Aromatic Hydrocarbons – compostos formados pela união de dois ou mais anéis de benzeno) (Marques, 2007). A presença de pequenas concentrações (cerca de 2%) de BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xileno) nesses compostos faz com que esses produtos sejam menos voláteis, mais densos, menos solúveis e menos móveis quando comparados à gasolina (Marques, 2007). Os combustíveis pesados e óleos lubrificantes, por sua vez, tendem a ser imóveis e insolúveis.

O comportamento dos hidrocarbonetos em um vazamento enquanto no solo seco obedece à gravidade, apresentando movimento descendente e quando atinge o nível d'água, propaga-se segundo os fluxos freáticos, respeitando as forças de capilaridade e condutividade hidráulica do solo (Marques, 2007).

3.3. Estudos de casos semelhantes e alternativas de remediação

A definição de áreas contaminadas é expressa por regiões que apresentem concentrações de poluentes, que são substâncias que causam riscos/danos a bens como águas superficiais e subterrâneas e à saúde de animais e humanos (CETESB, 2001).

A questão da contaminação subterrânea por hidrocarbonetos ganha uma dimensão ainda maior quando dados da ANP (Agência Brasileira de Petróleo) indicam que o Brasil apresenta um crescimento na quantidade de postos de combustíveis em funcionamento (ANP, 2015). Em 2008, o país contava com 36.730 revendedores de combustíveis automotivos, passando para 38.763 no ano de 2014 (ANP, 2015). Acompanhando o ritmo de crescimento dos postos de combustível, o número de casos de contaminação originado nesse tipo de atividade também aumentou (Darley de Lima, 2017).

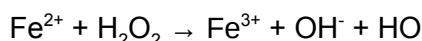
O gerenciamento de processos de remediação para áreas contaminadas com hidrocarbonetos decorre da necessidade de reduzir os riscos à saúde humana (Darley de Lima, 2017). O processo mais comum de remediação de águas subterrâneas contaminadas por compostos voláteis constitui-se do tratamento chamado de *pump and treat* (Tiburtius et al., 2004). Com este método, a água que se encontra contaminada é removida por bombeamento, sendo posteriormente submetida a processos que possibilitam a remoção dos poluentes. Esta água é finalmente descarregada, podendo ser reposta em seu reservatório natural (Tiburtius et al., 2004). A purificação da água se dá, comumente, por processos denominados *air stripping* e extração por adsorção em carvão ativado. Contudo, esses processos de purificação apresentam limitações, pois o “air stripping” provoca o desprendimento de gases poluentes para a atmosfera, e a adsorção resulta em formação de fases sólidas saturadas, com presença de contaminantes não-destruídos (Tiburtius et al., 2004). Ademais, os custos envolvidos nessa forma de remediação são altos, associados principalmente à complexidade das estruturas e tecnologias necessárias (Tiburtius et al., 2004).

A biorremediação decorre do potencial e capacidade que determinados organismos apresentam para deteriorar substâncias tóxicas e contaminantes (Juhasz e Naidu, 2000). A atuação de diferentes tipos de bactérias é justificada pela complexidade das contaminações, tendo cada microorganismo um papel a desempenhar. A busca por microorganismos que tenham atuação versátil poderá permitir que os custos desse método (que já são baixos) tornem-se ainda menores (Tiburtius et al., 2004).

A remediação natural (ou atenuação natural) é uma técnica atual para regiões contaminadas por hidrocarbonetos, cujo desempenho vem ganhando aceitação (Courseuil e Marins, 1997). Essa abordagem consiste na ação de mecanismos naturais como agentes de atenuação dos contaminantes dissolvidos no local (Courseuil e Marins, 1997). Essa estratégia, portanto, consiste da ação de processos químicos, biológicos e físicos, que tendem a aplacar os efeitos desses hidrocarbonetos (Wiedmeier et al., 1996). A remediação natural possibilita que o deslocamento dos contaminantes seja limitado, reduzindo, assim, as consequências que o poluente possa trazer para o meio (Courseuil e Marins, 1997; Tiburtius et al., 2004).

Contudo, os tratamentos existentes atualmente são por vezes taxados como ineficientes e caros. Nesse contexto, surgem tecnologias alternativas, como os processos oxidativos avançados (POA) (Tiburtius et al., 2004). Os POAs consistem da geração de radicais hidroxilas (HO), cuja reação com diversos compostos orgânicos é rápida e sem distinção. Essa ligação ocorre por meio de adição à dupla ligação ou ainda por abstração do

átomo de hidrogênio, em moléculas orgânicas alifáticas (Tiburtius et al., 2004). Dessa maneira, radicais orgânicos são formados, e estes irão reagir com oxigênio. A partir disto, diversas reações de deterioração surgem, podendo ocasionar a formação de compostos inócuos. Os processos de produção do radical hidroxila podem ser estimulados, por exemplo, pelo uso do reagente de Fenton (Tiburtius et al., 2004). Essa reação pode ser expressa como:



O uso de processos integrados, como a biodegradação seguida pelo processo de Fenton, surge como alternativa eficiente para a degradação de diversas espécies de poluentes orgânicos (Andreozzi et al., 2002).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

A aplicação de metodologias geofísicas para estudos de contaminações subterrâneas requer o uso de materiais específicos, assim como o próprio material de estudo. Os métodos utilizados, por sua vez, podem ser diversos, sendo que para cada caso específico existem melhores maneiras a ser abordadas, o que deve ser feito com consulta de trabalhos prévios semelhantes.

4.1. Materiais

Os materiais utilizados nesse trabalho são disponibilizados pela Universidade de São Paulo. Estes se dividem em duas categorias: equipamentos de campo e softwares. Entre os materiais utilizados em campo estão: GPS, trena, eletrodos, multímetro, resistivímetro (Figura 4.1.), fios, bússola. Os softwares, por sua vez, entram na produção de escritório, sendo utilizados os programas Res2dinv, Ipi2win e Surfer, disponíveis gratuitamente.



Figura 4.1. Exemplo de resistivímetro utilizado em campo. Extraído de CETESB, 1999.

As atividades realizadas no período entre a entrega do Projeto Inicial e o Relatório de Progresso foram: aprendizado de campo e de processamento/interpretação de dados na disciplina GSA0519 (Geofísica Aplicada ao Estudo de Poluição Subterrânea), evolução no processamento/interpretação de dados e aprofundamento bibliográfico no desenvolvimento deste Trabalho de Formatura. Os dados de campo da disciplina não são apresentados nesta Monografia porque são parte integrante de outro Trabalho de Formatura de uma aluna.

A etapa de campo se realizou entre os dias 24 e 28 de abril, no campus da Universidade de São Paulo, na cidade de Pirassununga-SP. O trabalho de campo possibilitou a aprendizagem da aplicação prática da metodologia empregada, assim como permitiu o contato da aluna com o tratamento de dados adquiridos em campo. Na já citada disciplina GSA0519 foram utilizados os métodos da eletrorresistividade (com as técnicas sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico) e potencial espontâneo. Para esses dados, foram utilizados os softwares Surfer 8, IPI2WIN e RES2DINV. Alguns procedimentos realizados em campo podem ser observados nas Figuras 4.2. e 4.3.



Figura 4.2. Procedimento para a obtenção de dados a partir da técnica SEV.



Figura 4.3. Procedimento para a obtenção de dados a partir da técnica CE.

4.2. Métodos

Os métodos utilizados consistem tanto daqueles aplicados em campo como no processamento posterior dos dados. Em campo o arranjo eletródico empregado foi o dipolo-dipolo com abertura $AB=MN=4\text{m}$ e 06 níveis de investigação ($n=06$) e a equidistância entre os perfis levantados (08 perfis) foi de 04m, configurando uma malha regular de 4 x 4m. No processamento dos dados foram empregados os softwares Surfer 8 e RES2DINV.

4.2.1. Eletorresistividade

A metodologia utilizada para o estudo da pluma de contaminação se baseou no fato de que o uso da eletorresistividade é eficiente na delimitação de plumas de contaminações por hidrocarbonetos. O método da eletorresistividade depende do uso de uma fonte artificial de corrente, cuja introdução no terreno se dá por meio de dois eletrodos em contato galvânico com o solo (Gallas, 2000). Os eletrodos de emissão permitem que correntes criem um potencial no meio; esse potencial é medido por outros dois eletrodos de medição igualmente em contato galvânico (Telford et al., 1990; Gallas, 2000). Dessa maneira, com o conhecimento prévio da corrente e do potencial gerado, pode-se calcular as resistividades locais. A disposição dos eletrodos é chamada arranjo e sua escolha se define de acordo com os objetivos de estudo e peculiaridades de cada ensaio e terreno (Gallas, 2000).

A metodologia se suporta do conhecimento de que diversos materiais apresentam diferentes propriedades e respostas elétricas (Telford et al., 1990; Gallas, 2000). No caso da eletorresistividade, a resistividade (que corresponde ao inverso da condutividade) é a característica que permite a aplicação do método. Para que se entenda o conceito de resistividade, é necessário entender que a corrente elétrica se propaga de duas formas nos mais diversos materiais: iônica e eletrônica (Gallas, 2000).

A condução eletrônica é possível em materiais que disponham de elétrons livres, como ocorre em metais e sulfetos metálicos. A condução iônica, por sua vez, decorre do fluxo da corrente através de íons. Os levantamentos geofísicos de eletorresistividade têm a condução iônica como método condutivo de maior relevância (Gallas, 2000).

A grande maioria das rochas pode ser considerada como um eletrólito sólido, com a condução iônica tomando lugar em cristais ligados ionicamente. Contudo, para a aplicação do método da eletorresistividade, o interesse é maior em eletrólitos líquidos (Gallas, 2000). O comportamento esperado das rochas são valores de resistividades altas (por serem maus condutores), mas isso não se observa na prática. A diferença entre a compreensão teórica e a empírica se deve do fato de que as rochas costumam apresentar fraturas e porosidades, preenchidas por água. A água possibilita o processo da condução iônica, atuando em moléculas com presença de íons.

Os sais também exercem influência sobre a resistividade e estes podem se dissociar em íons. A salinidade pode ser obtida a partir da salinidade equivalente (que é definida pela salinidade de uma solução que contivesse somente NaCl mesmo tendo a presença de diversos sais, mas com mesmo volume). Esse procedimento facilita o processo de cálculo da salinidade e pode ser considerada verdadeira, tendo em vista que a mobilidade dos íons

presentes não varia grandemente (Gallas, 2000). Dessa maneira, a resistividade de uma rocha dependerá de sua quantidade de água, da salinidade desta e a distribuição deste fluido na rocha (Gallas, 2000).

O estudo da resistividade pode focar tanto na análise das heterogeneidades verticais como laterais. O estudo da variação vertical das resistividades se aplica em terrenos estratificados, e procede-se aumentando a abertura dos eletrodos de emissão gradativamente, para que níveis mais profundos possam ser investigados (Gallas, 2000). Contudo, esse processo de aumento da distância entre os eletrodos de emissão tem como efeito o aumento da espessura do pacote superior de estudo. Dessa maneira, evidencia-se o efeito das resistividades dos estratos mais superficiais em relação aos inferiores (Gallas, 2000). A técnica utilizada nessas situações é denominada sondagem elétrica vertical.

Nas investigações laterais, por sua vez, a separação entre os eletrodos é geralmente fixa, com deslocamento do arranjo eletródico ao longo de perfis (Gallas, 2000). Esse tipo de investigação se faz útil na presença de diques e falhas. Nesta situação, a técnica de eletrorresistividade utilizada é denominada perfilagem horizontal ou caminhamento elétrico. Os dados medidos em um levantamento de campo de eletrorresistividade são corrente elétrica I (emitida pelos eletrodos A e B) e a diferença de potencial ΔU (medida pelos eletrodos M e N). Com esses valores, é possível obter a resistividade ρ , que é sempre a mesma em um terreno homogêneo e isotrópico. Contudo, na natureza, os estratos tendem a ser heterogêneos (Figura 4.4.) e a resistividade medida terá influência de todas as resistividades presentes, sendo chamada de resistividade aparente, e não verdadeira (Orellana, 1972).

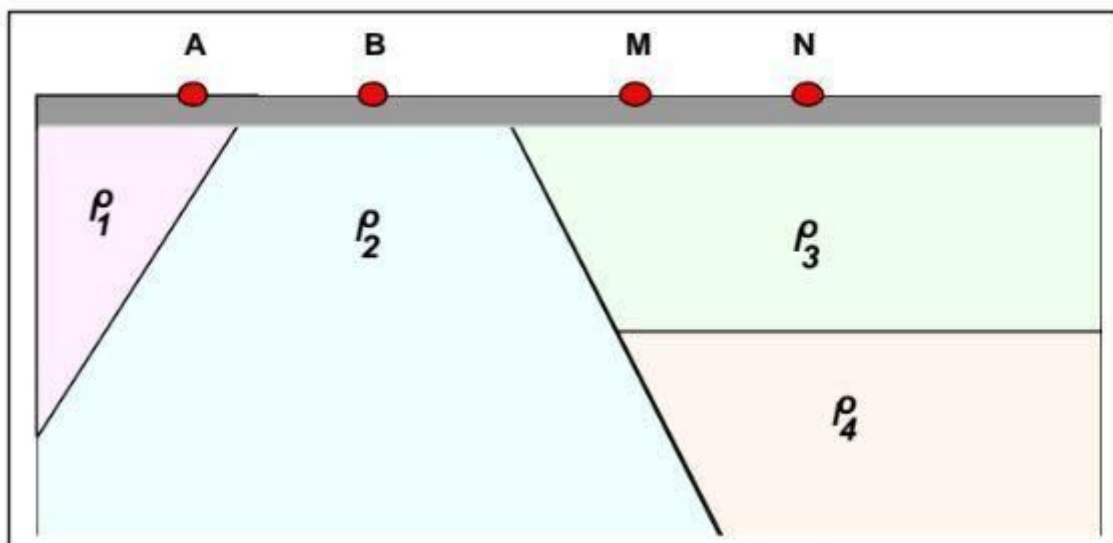


Figura 4.4. Ilustração do subsolo heterogêneo e distribuição das resistividades. Extraído de Gallas, 2000.

A resistividade aparente pode ser expressa como:

$$\rho_a = K \frac{\Delta U}{I}$$

Sendo ρ_a a resistividade aparente; ΔU significa a diferença de potencial; I é a intensidade da corrente passante, injetada a partir de dois eletrodos, e K corresponde ao fator geométrico, que depende das dimensões e arranjos utilizados em campo (Gallas, 2000).

Os dados utilizados nesse trabalho se referem especificamente ao método da eletrorresistividade aplicando-se a técnica do caminhamento elétrico. O arranjo escolhido foi dipolo-dipolo, que se caracteriza por espaçamento MN (eletrodos de recepção de sinal) igual a AB (eletrodos de corrente), sendo que ambos os dipolos se deslocam ao longo da linha de estudo (Telford et al., 1990; Gallas, 2000). É usual a investigação se realizar em diferentes níveis (Figura 4.5.) e, para que diferentes profundidades sejam atingidas, é necessário movimentar os eletrodos MN (MN, M1N1, M2N2, e assim por diante) ao longo do perfil de estudo, mantendo deslocamentos iguais a l (os eletrodos AB permanecem fixos). O arranjo se define pelas aberturas $x=AB=MN$. A profundidade investigada aumenta com a distância R e, na pseudo-seção gerada, corresponde a $\frac{1}{2} R$ (Gallas, 2000). Os eletrodos AB são movidos, e novos deslocamentos M'N', M1'N1', M2'N2' são realizados.

Neste trabalho a abertura entre eletrodos empregada foi $AB=MN=4m$ e 06 níveis de investigação. O dimensionamento do arranjo foi definido em função das profundidades a serem atingidas e dimensões esperadas para os tanques em subsuperfície.

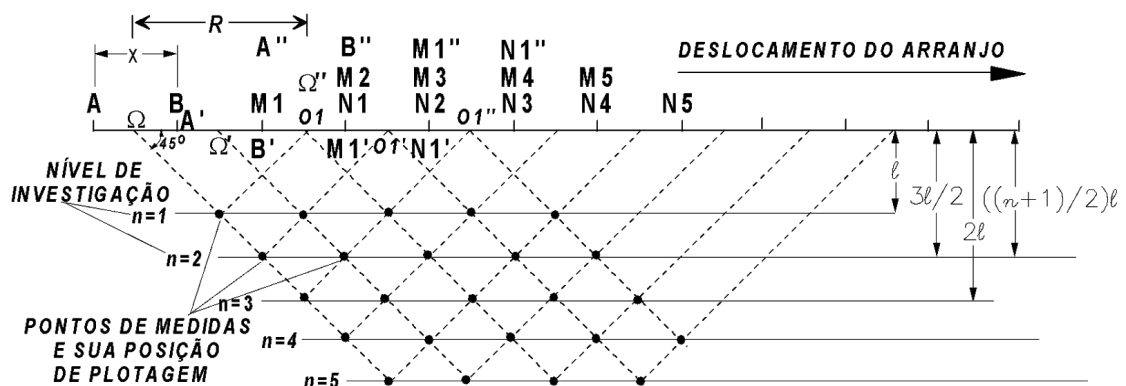


Figura 4.5. Caminhamento Resistividade/Disposição no campo do arranjo dipolo-dipolo (Gallas, 2000).

4.2.2. Processamento de Dados

Os dados obtidos em campo foram posteriormente tratados em softwares que possibilitam uma melhor visualização e interpretação dos resultados. Dessa maneira, o procedimento inicial foi a compilação dos dados de campo em tabelas, seguindo as diretrizes fornecidas nos manuais dos softwares utilizados. Os programas utilizados foram Surfer 8 v.10.4 (produto da Golden Software Inc) e RES2DINV v.3.58 (produto da Geotomo Software Malaysia).

O programa Surfer 8 realiza a interpolação de dados em arquivos XYZ de espaçamento regular ou irregular numa grade (*grid*) regular, possibilitando a produção de pseudo-seções, seções modeladas, mapas de contorno, simulação de blocos 3D, mapas de superfície, dentre outros (Golden Software Inc., 2002). A krigagem foi o método de interpolação escolhido para o tratamento dos dados.

O programa RES2DINV possibilita os processos de inversão dos dados de levantamentos elétricos e produz automaticamente um modelo bidimensional (Geotomo Software, 2010) que, teoricamente, representam a distribuição das resistividades em subsuperfície. Esses procedimentos possibilitam a criação de modelos mais realísticos, levando em conta os valores de profundidades de investigação sugeridas por Edwards (1977). Estes coeficientes sugeridos para as profundidades de investigação são empíricos, propondo uma pseudo-seção modificada a partir desses valores (Edwards, 1977; Gallas, 2000).

5. RESULTADOS OBTIDOS

Os resultados obtidos são decorrentes dos processamentos computacionais, que resultam em pseudo-seções de resistividade, seções modeladas, mapas de resistividade e simulação de modelos tridimensionais.

5.1. Pseudo-seções e seções modeladas

As pseudo-seções e seções modeladas podem ser vistas nas figuras de 5.1. a 5.8. correspondendo, respectivamente, às Linhas A até H.

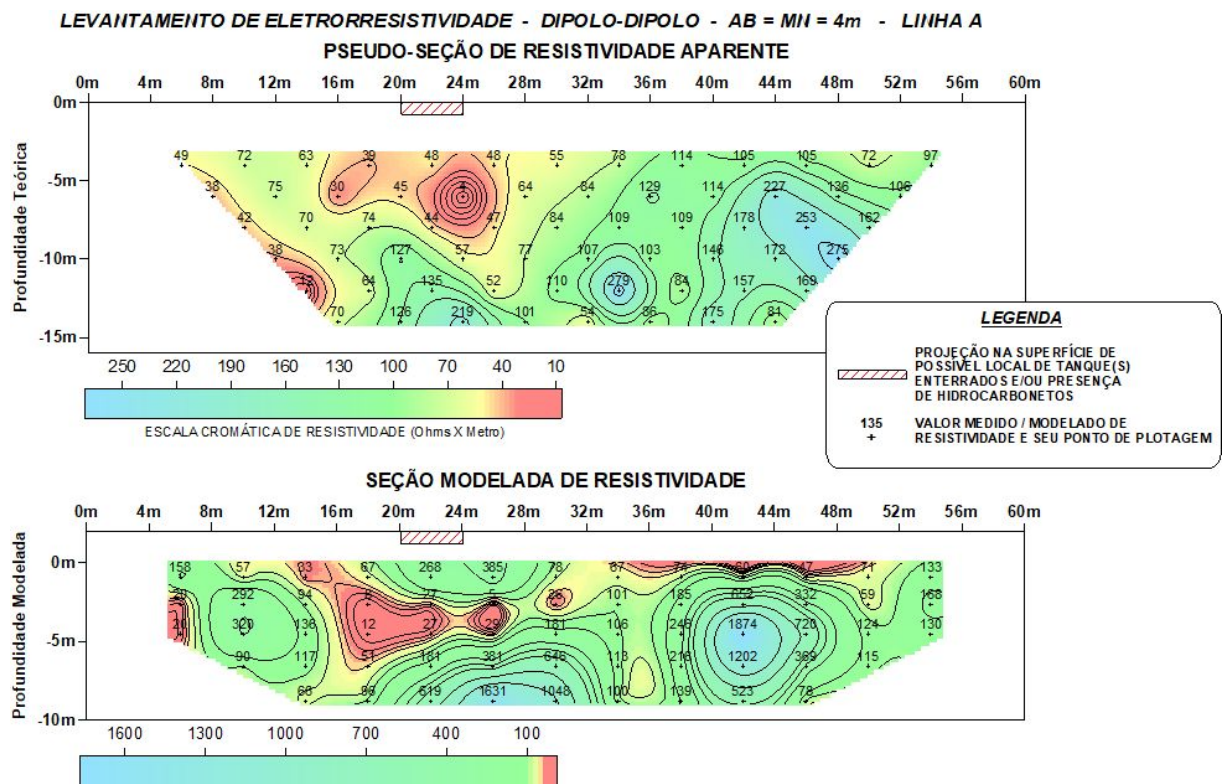


Figura 5.1. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha A.

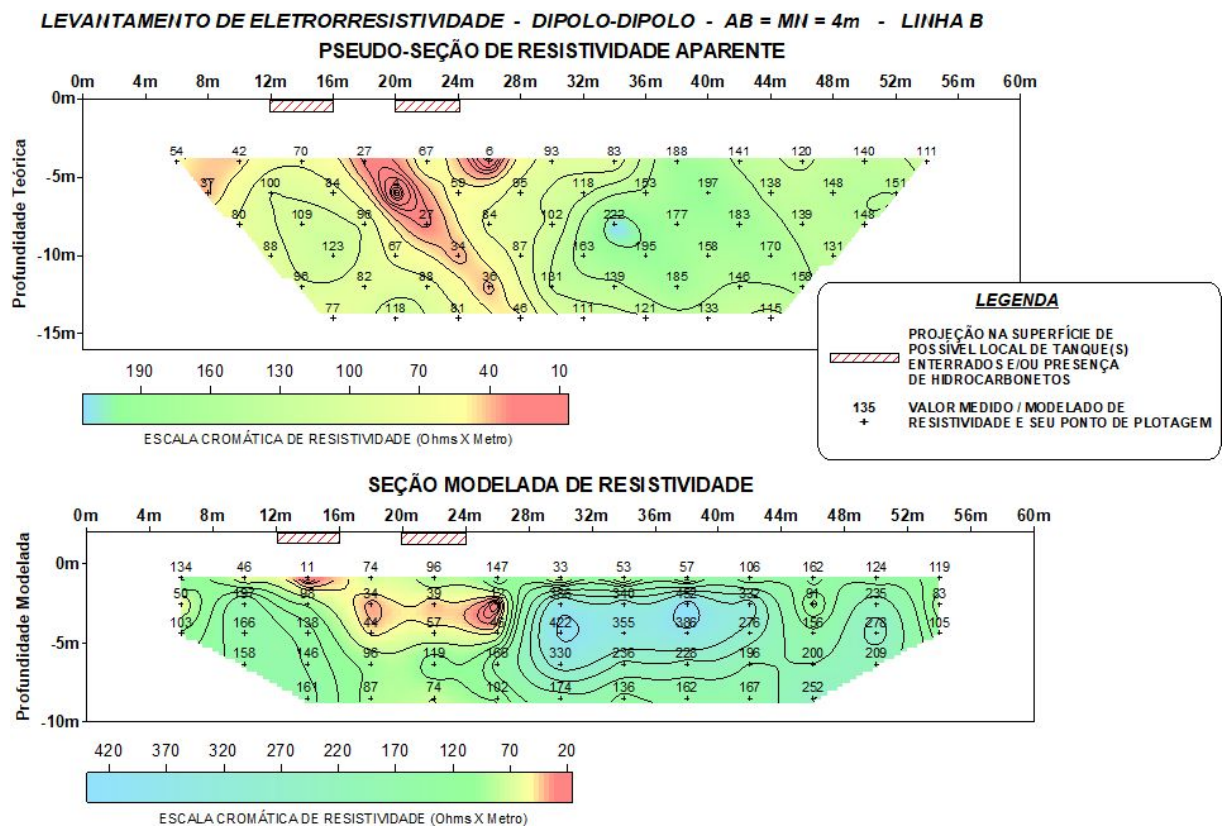


Figura 5.2. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha B.

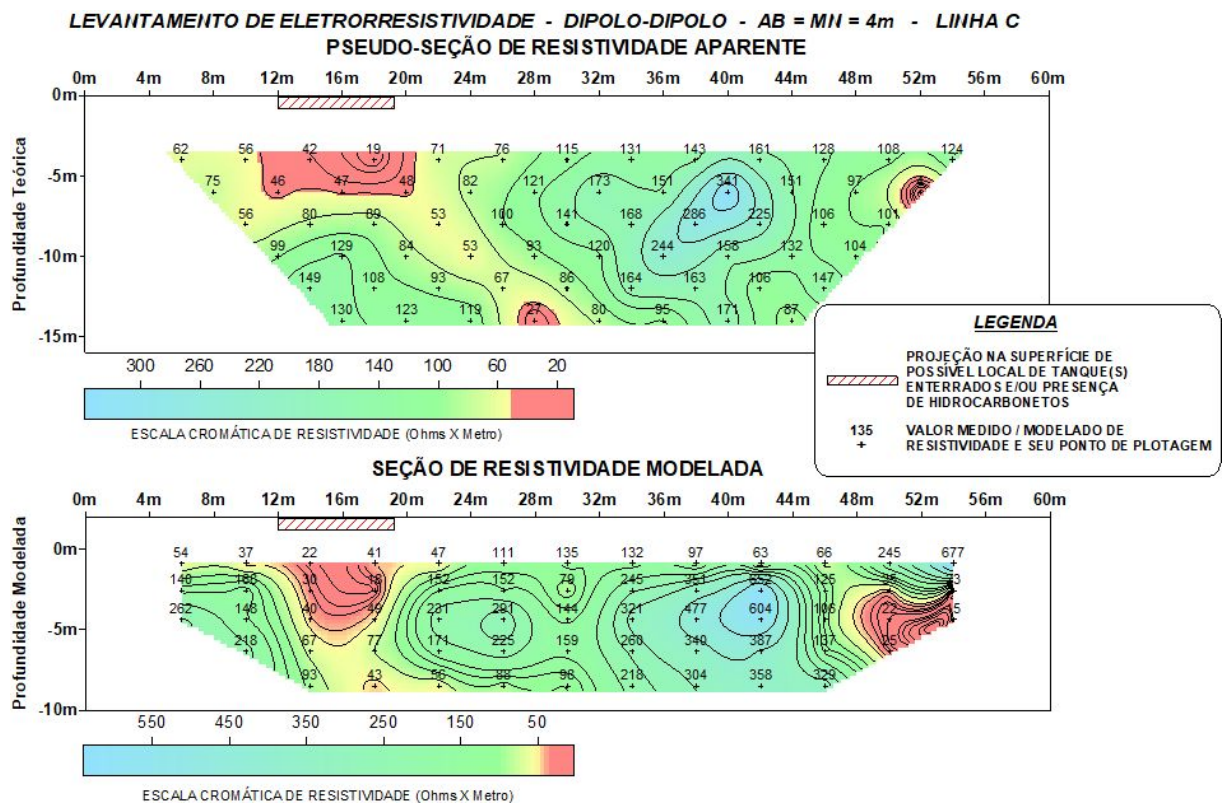


Figura 5.3. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha C.

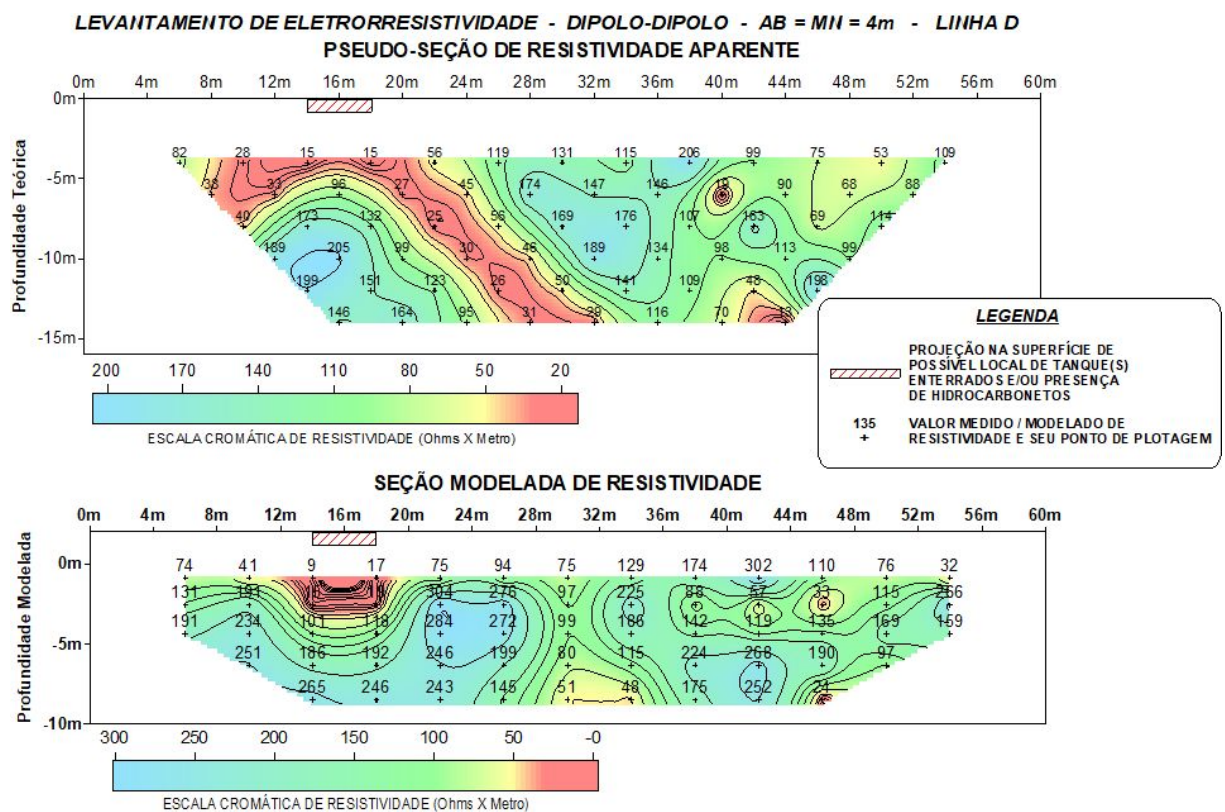


Figura 5.4. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha D.

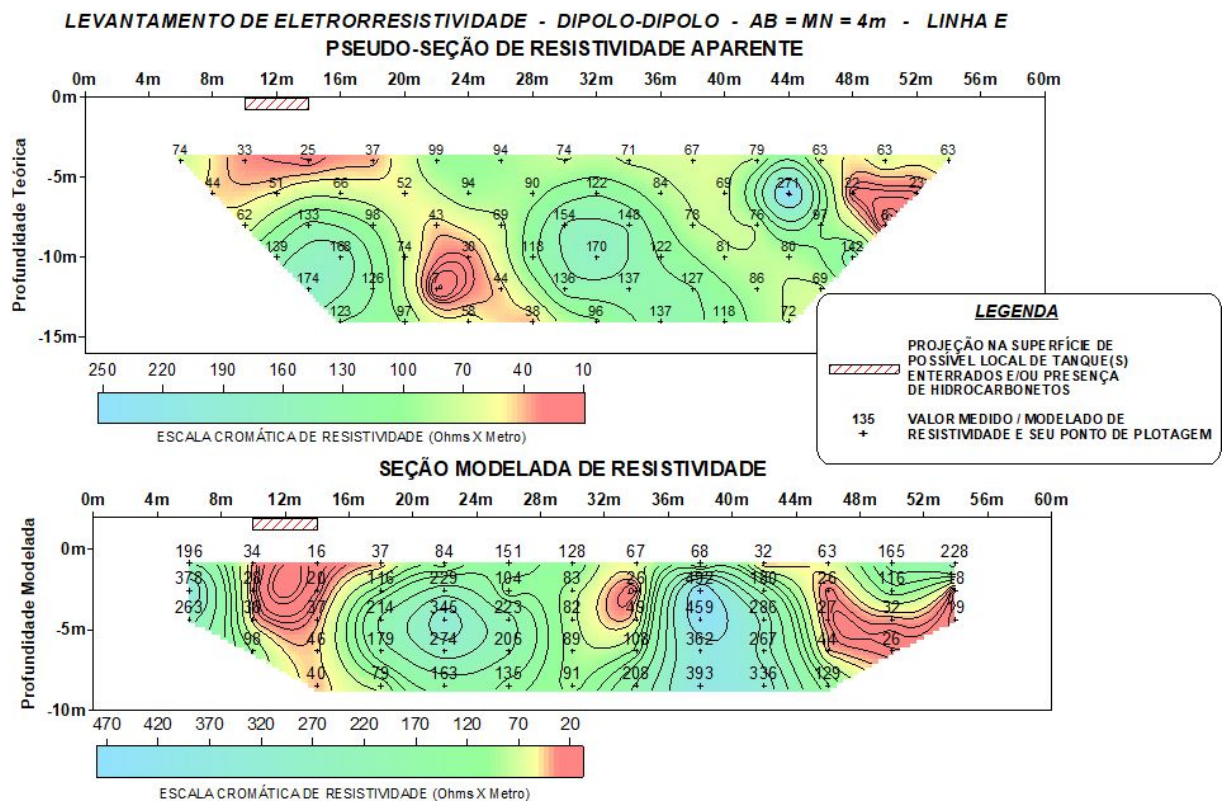


Figura 5.5. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha E.

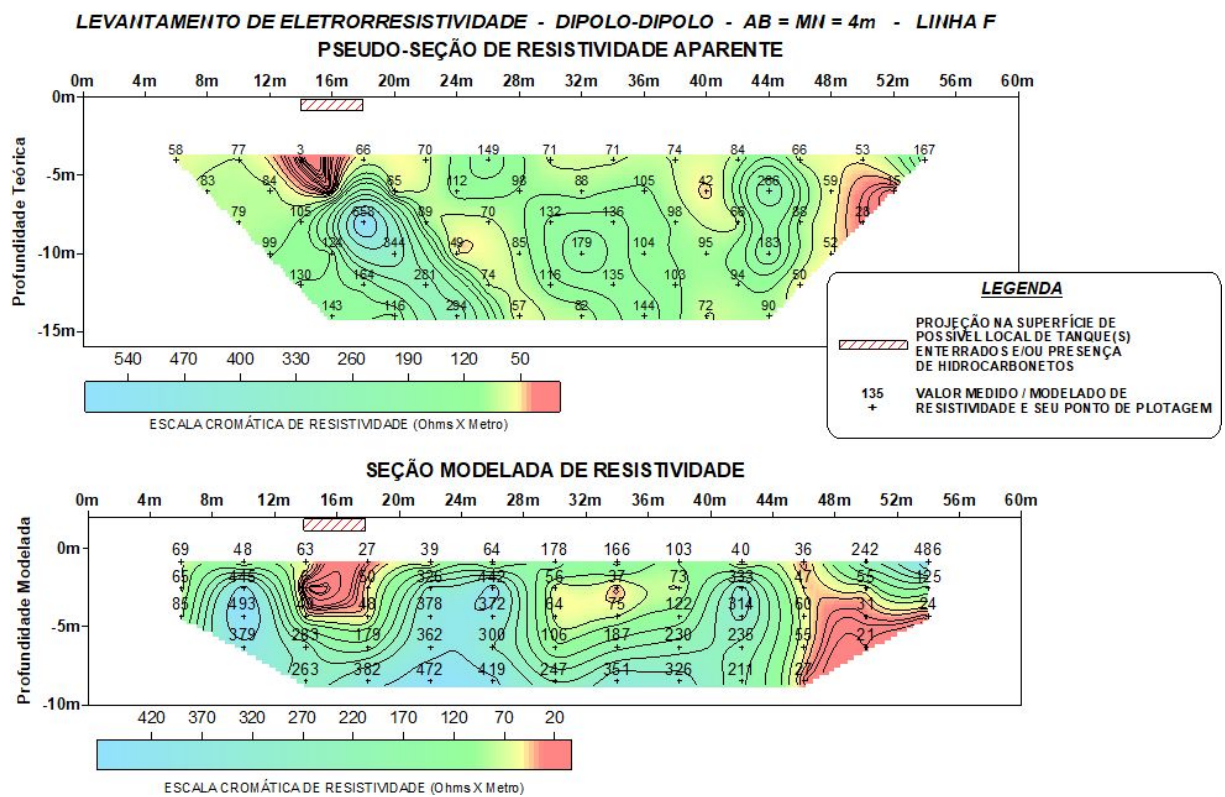


Figura 5.6. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha F.

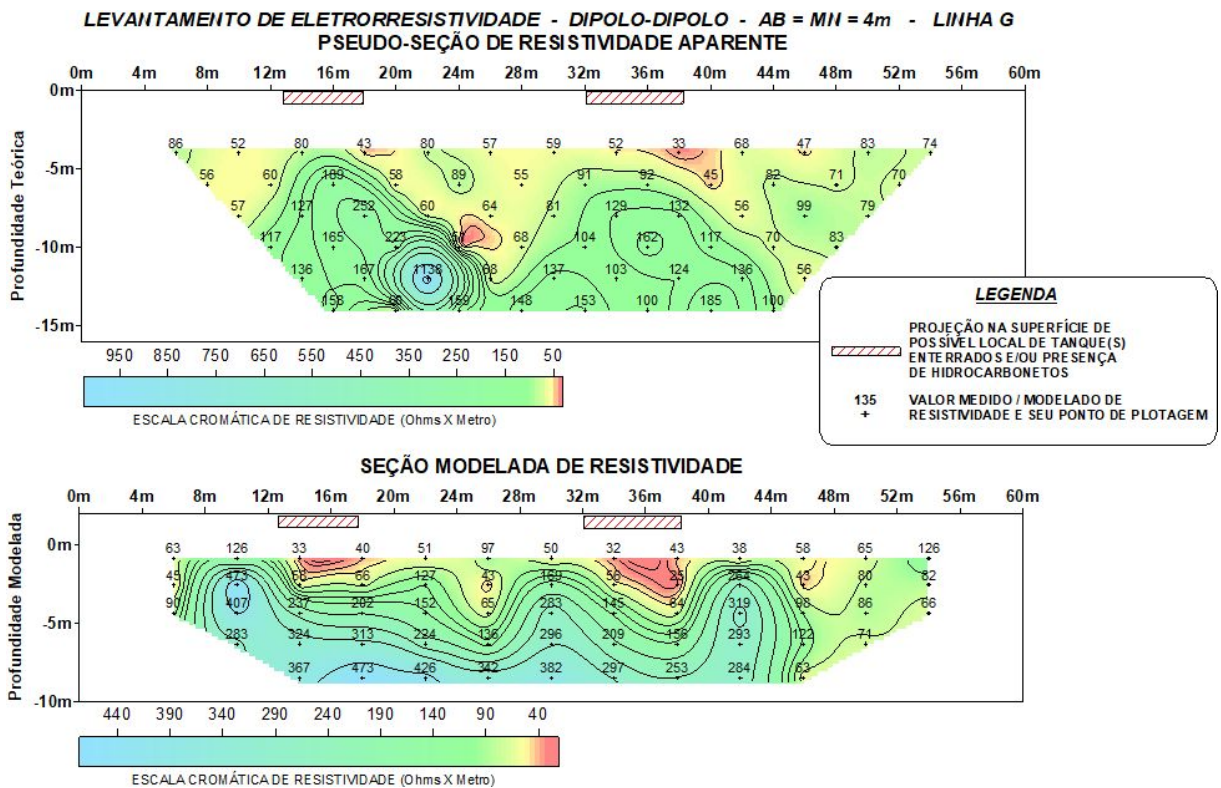


Figura 5.7. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha G.

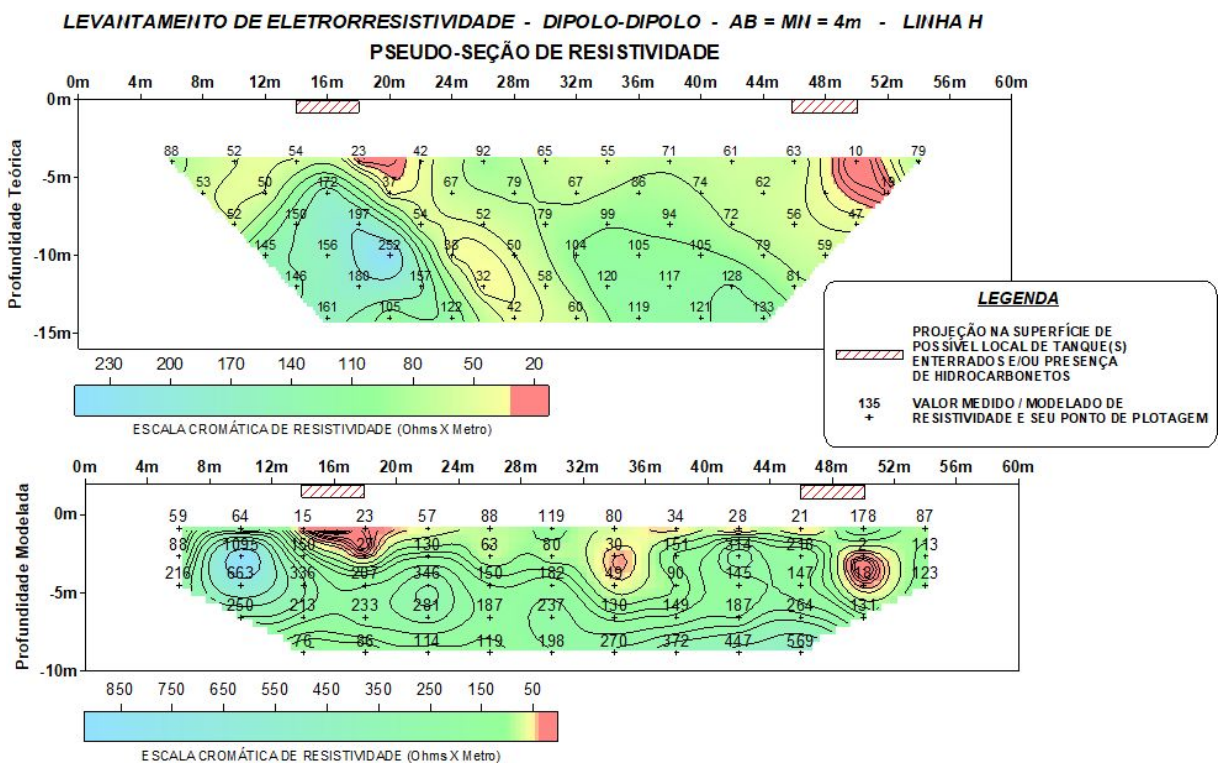


Figura 5.8. Pseudo-seção de resistividade aparente e seção modelada de resistividade para a Linha H.

A análise das seções nos permite considerar regiões de maiores e menores resistividades. A projeção na superfície dos locais de baixas resistividades – locais

contaminados e/ou tanques enterrados – é indicada pelos retângulos de padrão hachurado em vermelho. Além disso, as cores amarelo-avermelhadas nas pseudo-seções e seções modeladas indicam os locais em subsuperfície que devem estar contaminados.

As zonas de baixa resistividade apresentam-se na seção modelada de maneira similar àquelas das presentes nas pseudo-seções. Contudo, a seção modelada permite que os limites dessas anomalias sejam mais bem definidos, tomando formas diferentes das expressas nas pseudo-seções. Estas regiões contaminadas continuam sendo identificadas pela coloração avermelhada (correspondente às menores resistividades).

5.2. Mapas de resistividade

A partir dos dados das seções modeladas de resistividade (figuras 5.1. a 5.8.), foram elaborados mapas de resistividade para os 5 níveis resultantes da modelagem. Estes mapas são apresentados nas figuras 5.9. a 5.13. Esta distribuição de resistividades em diferentes profundidades possibilita que se tenha uma visualização tridimensional da pluma de contaminação investigada. Pode ser claramente constatado que os limites da contaminação em profundidade vai até a o nível 3 modelado (aprox. = 5,0m). Aparentemente, somente as resistividades baixas situadas à esquerda (porção WSW) da área devem ser devidas às contaminações e/ou presença de tanques em subsuperfície. As investigações diretas (escavações) corroboraram esta hipótese.

Desse modo, os limites laterais da pluma devem estar delimitados pela linha tracejada em azul indicada nas figuras 5.9. a 5.13. do lado esquerdo da área estudada. As anomalias de baixa resistividade ao centro e à direita, devem ser atribuídas a causas distintas, antrópicas ou naturais.

PROFUNDIDADE MODELADA = APROX. 0 A 1,5m

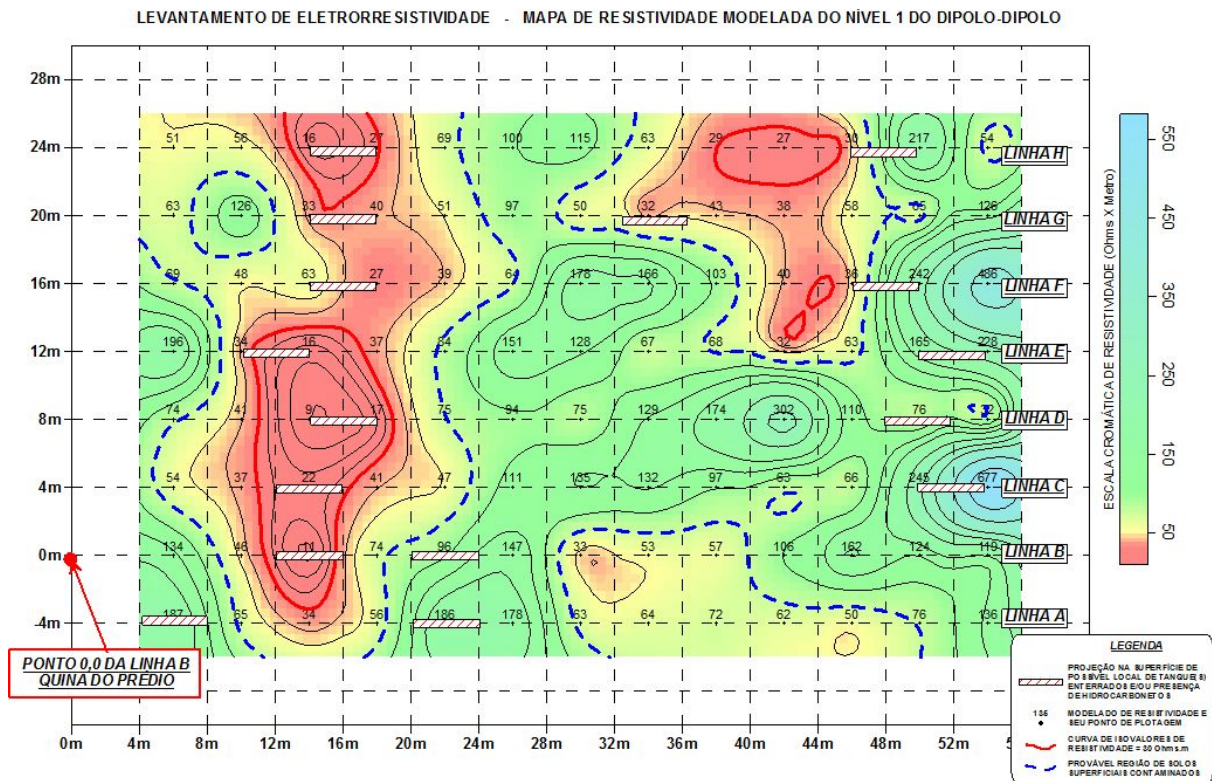


Figura 5.9. Mapa de resistividade modelada do nível 1. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 1,5m.

PROFUNDIDADE MODELADA = APROX. 0 A 2,5m

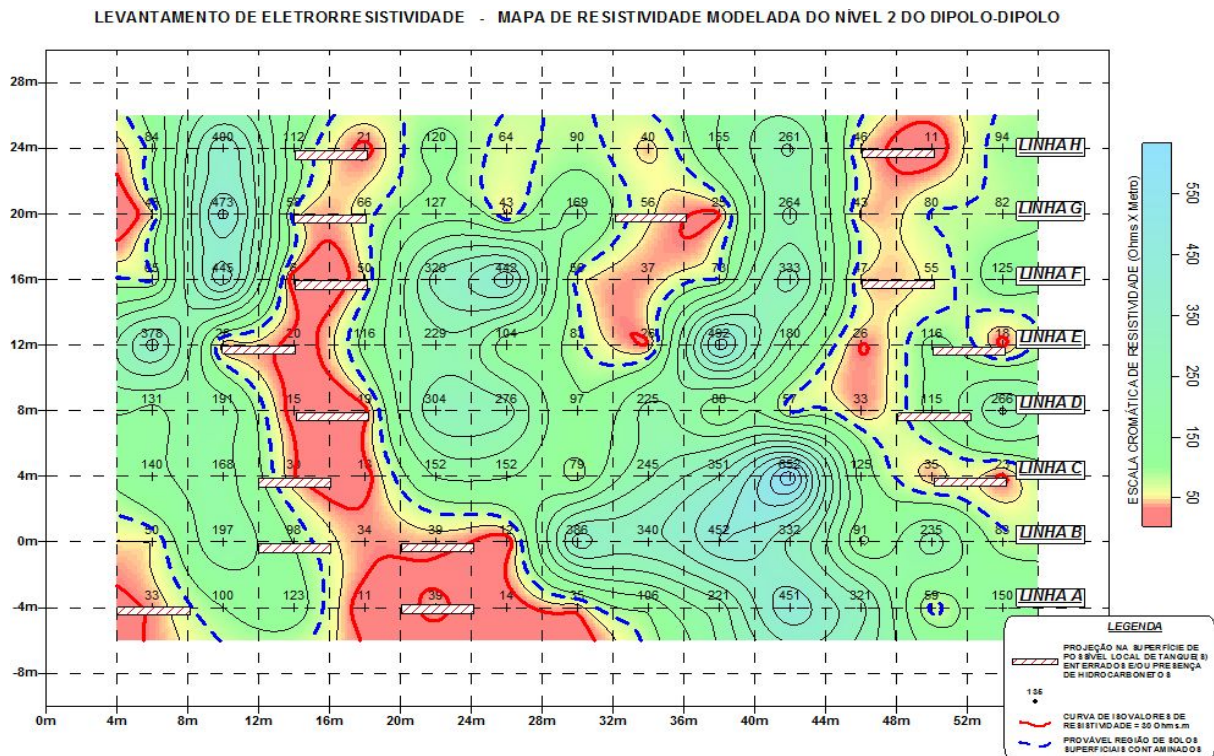


Figura 5.10. Mapa de resistividade modelada do nível 2. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 2,5m.

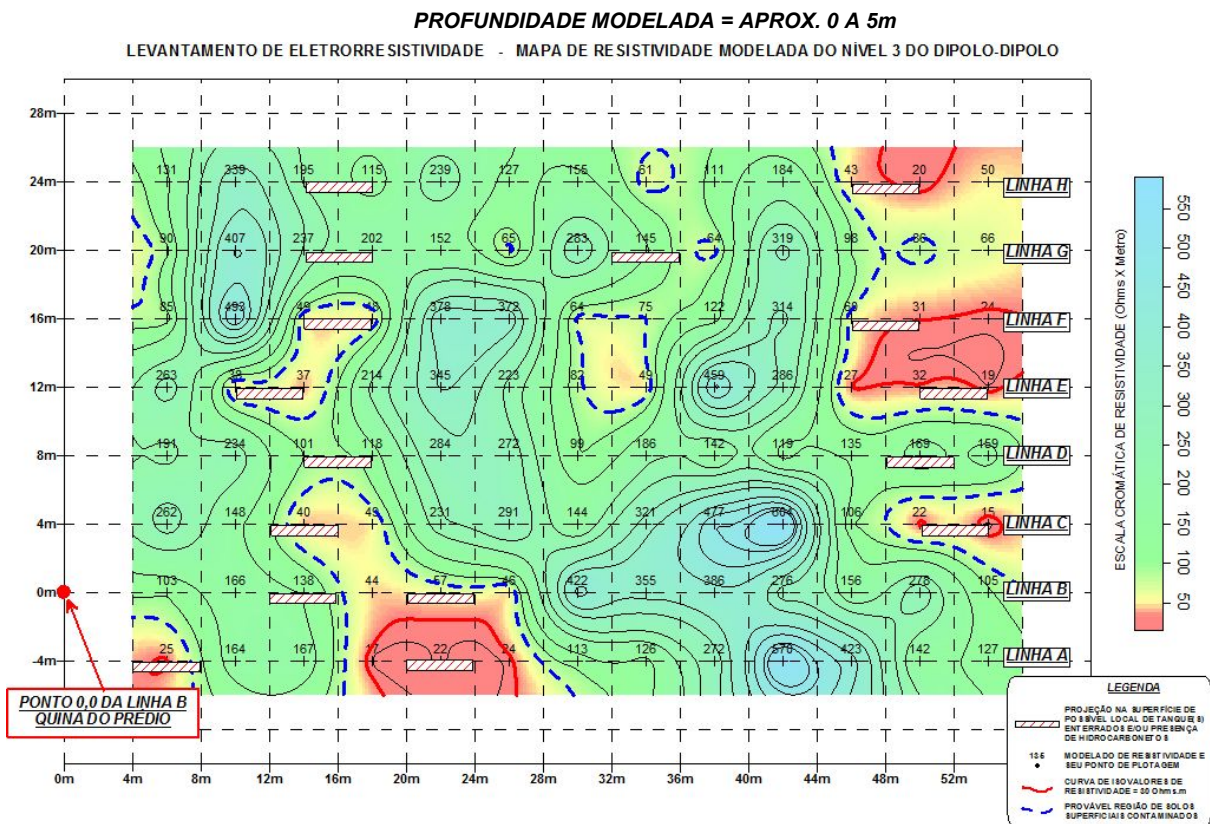


Figura 5.11. Mapa de resistividade modelada do nível 3. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 5m.

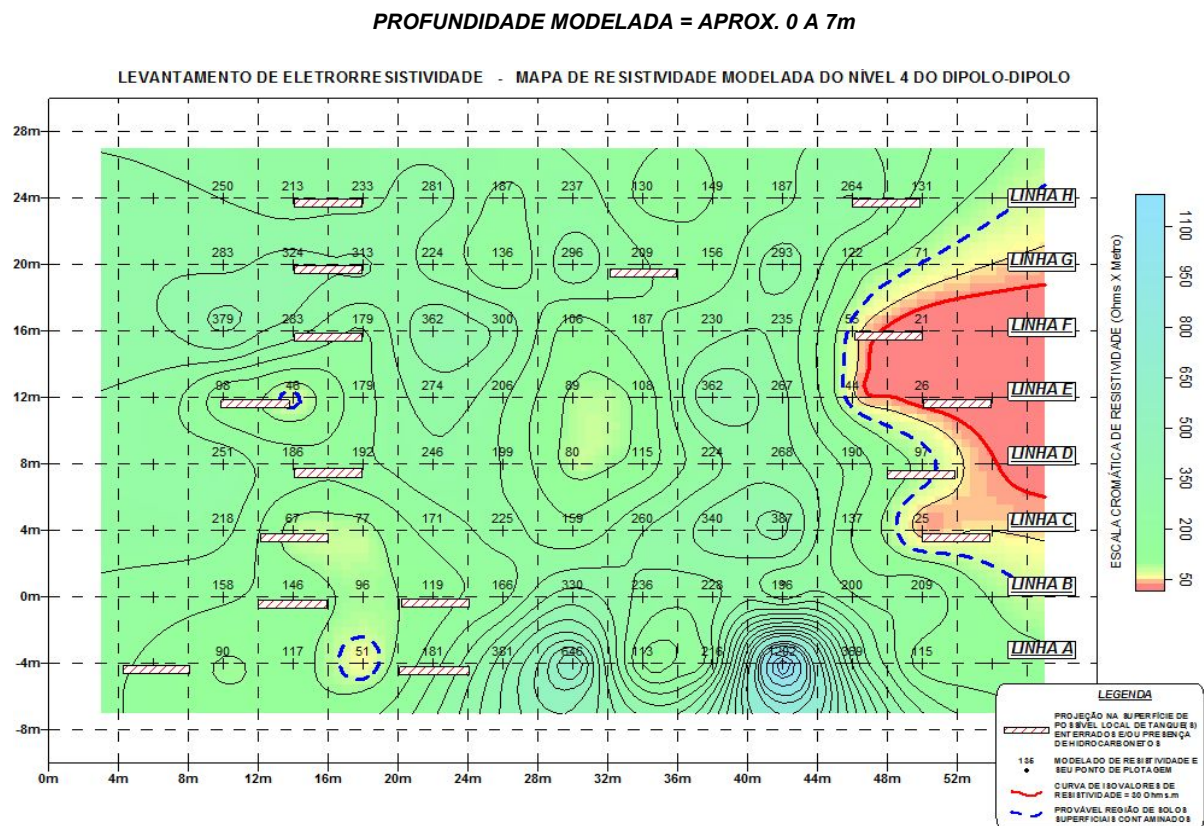


Figura 5.12. Mapa de resistividade modelada do nível 4. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 7m.

PROFUNDIDADE MODELADA = APROX. 0 A 9m

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE - MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA DO NÍVEL 5 DO DIPOLO-DIPOLO

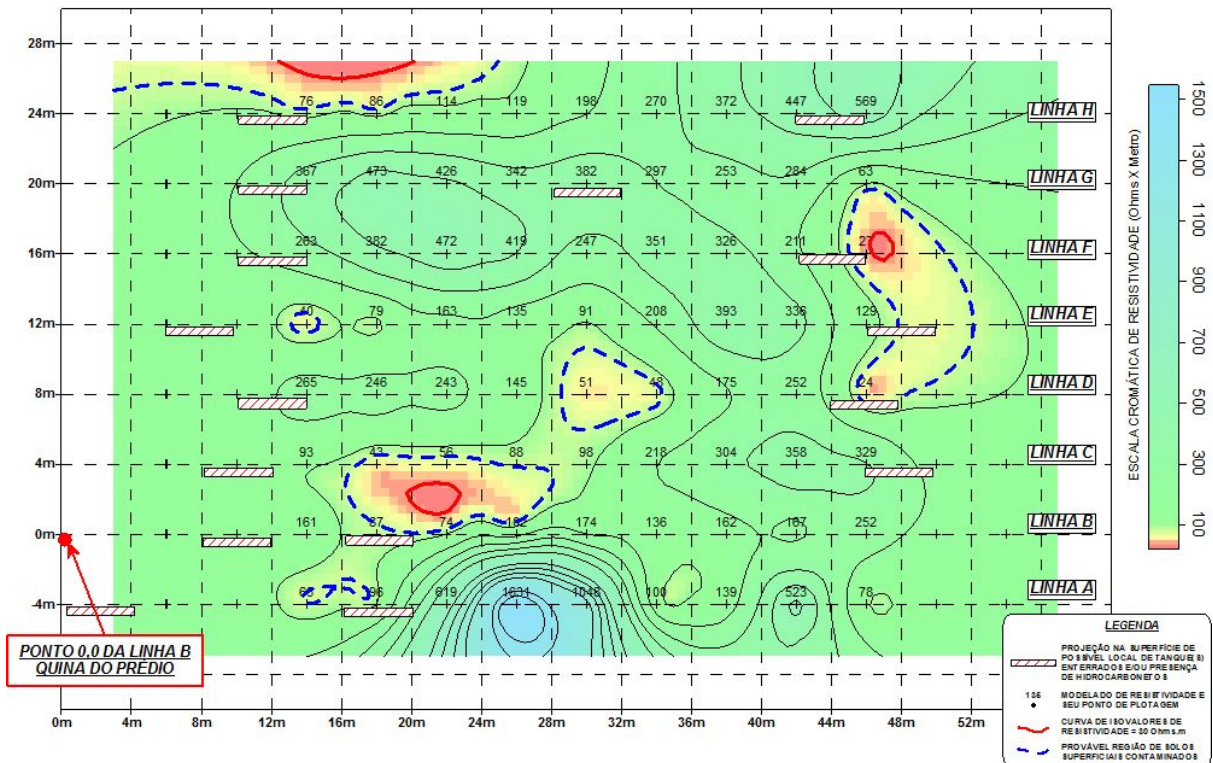


Figura 5.13. Mapa de resistividade modelada do nível 5. A profundidade modelada é do intervalo de aproximado de 0 a 9m.

5.3. Modelos tridimensionais (simulações, blocos diagrama)

A elaboração de simulações tridimensionais (blocos diagrama) possibilita mais uma maneira de se apresentarem os dados obtidos em campo. As imagens das Figuras 5.14. a 5.18. apresentam essas simulações 3D.

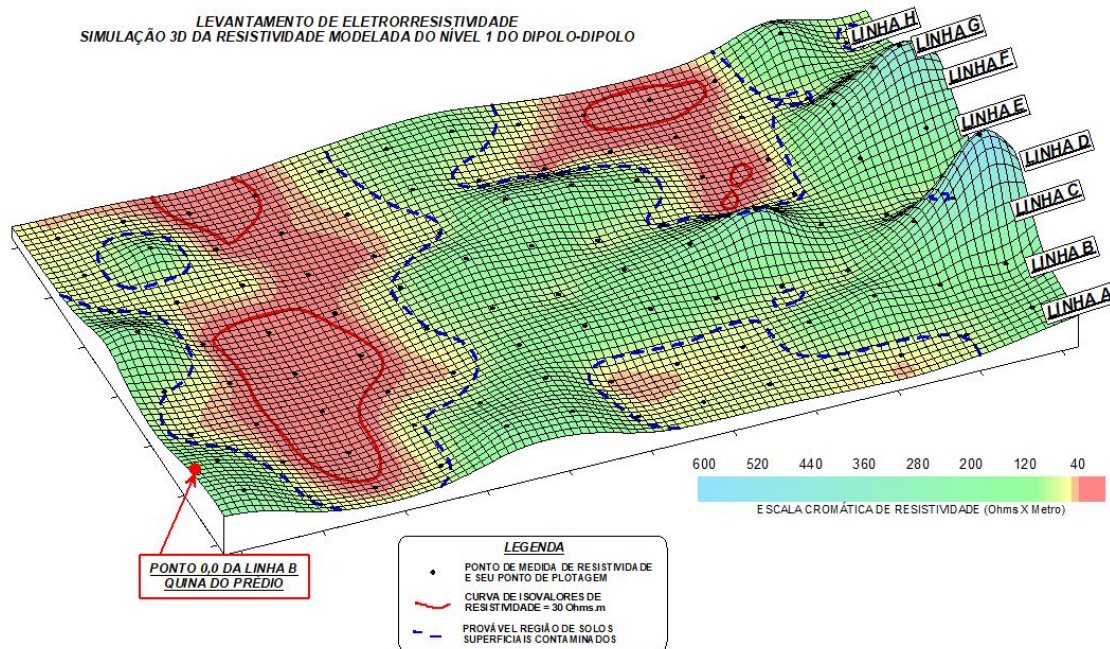


Figura 5.14. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 1.

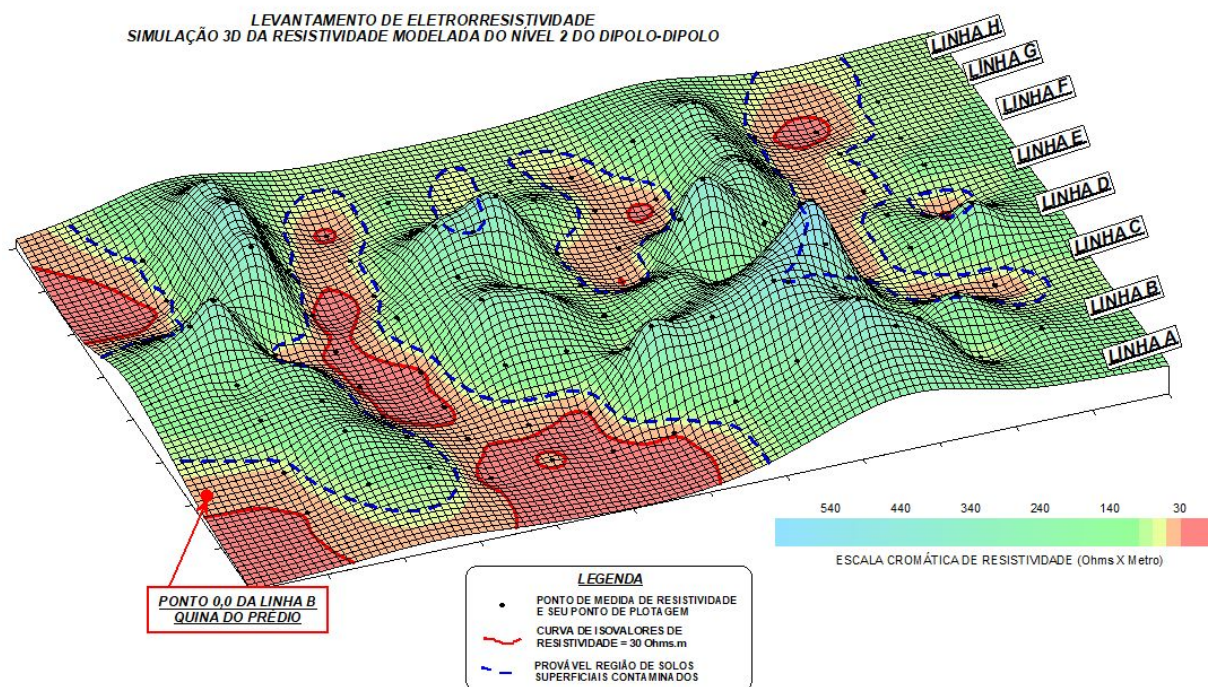


Figura 5.15. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 2.

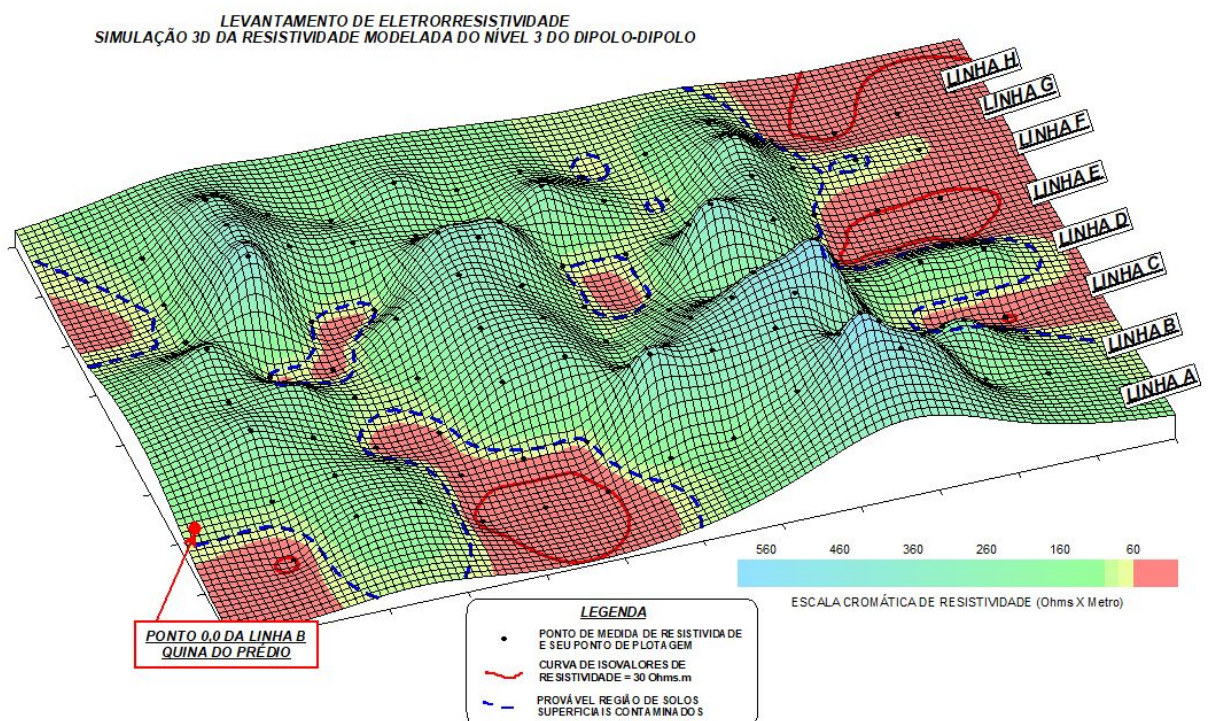


Figura 5.16. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 3.

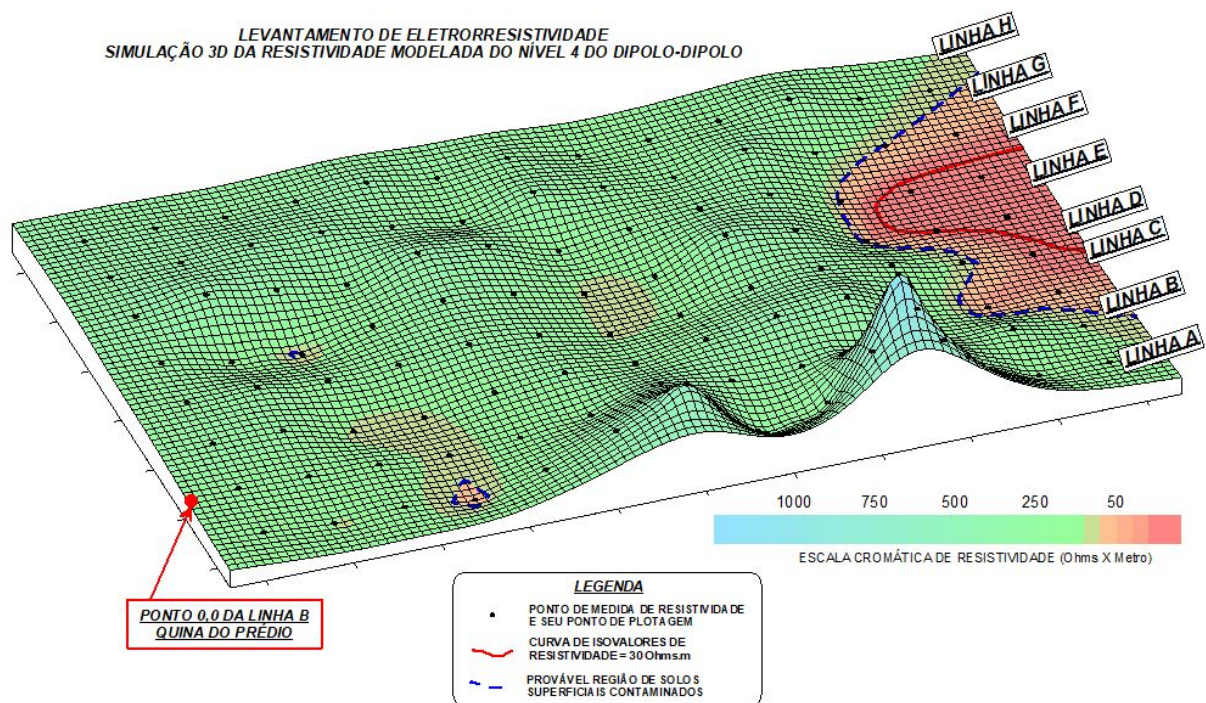


Figura 5.17. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 4.

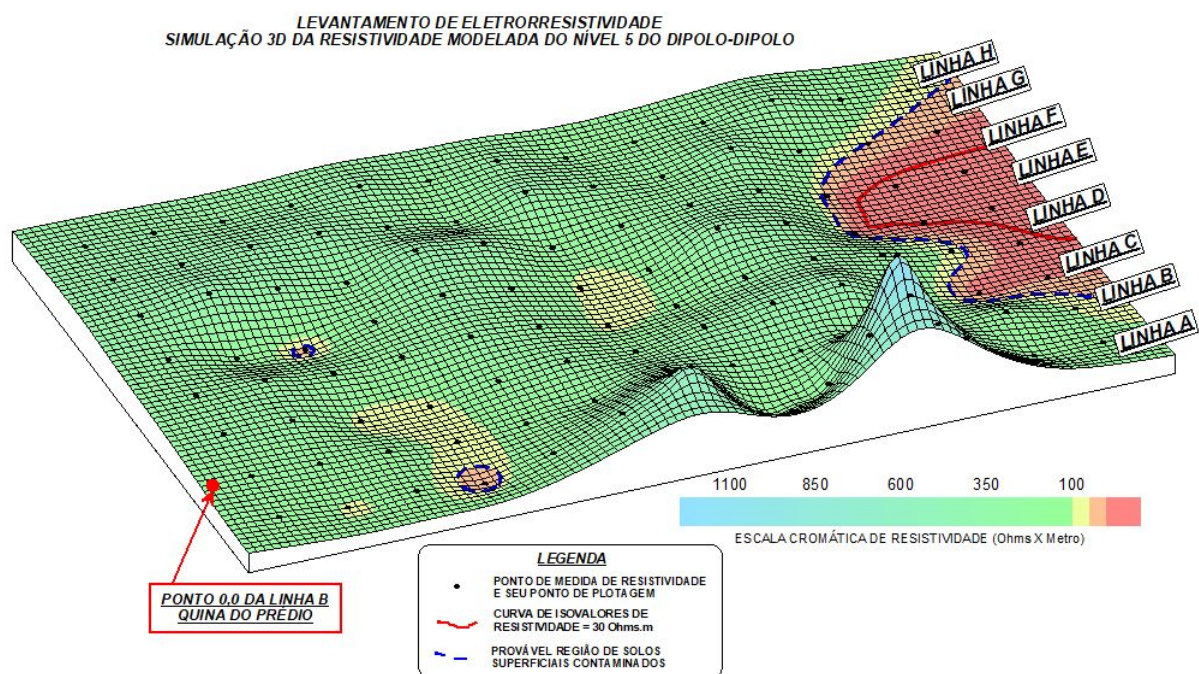


Figura 5.18. Simulação 3D da resistividade modelada do nível 5.

6. INTERPRETAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A geofísica pode ser utilizada como forma de delimitar contaminações no subsolo, destacando-se o emprego da eletrorresistividade para a investigação causada por hidrocarbonetos (Azambuja et al., 1999). Esta alternativa de estudo, sem a necessidade de extensivas investigações diretas (como coleta de amostras, sondagens e análises químicas), possibilita economia de tempo e recursos (Azambuja et al., 1999), tendo-se a geofísica como uma ferramenta que irá direcionar e otimizar as investigações diretas (sondagens, escavações, dentre outras).

É possível encontrar exemplos muito parecidos ao caso apresentado nesse trabalho na literatura, onde uma pluma de contaminação formada de hidrocarbonetos é mapeada por métodos eletrorresistivos. Sauck et al. (1998) apresentam o estudo de um caso quase idêntico: a pluma de contaminação de LNAPL foi investigada por eletrorresistividade a partir da técnica dipolo-dipolo. Outro caso muito semelhante é o verificado por Marques (2007), que empregou o método IP (polarização induzida) e eletrorresistividade. Os resultados obtidos são equivalentes: as regiões onde a pluma se apresenta são marcadas por resistividades menores do que as do seu entorno. Sauck et al. (1998) também contaram com a aplicação de GPR, SP e eletrorresistividade com a técnica da sondagem elétrica vertical, todos obtendo resultados similares.

Compostos LNAPL tendem a se infiltrar no solo por interferência da gravidade, com movimentação lateral até que se atinja o nível saturado (Menezes et al. 2011). É interessante notar que enquanto os experimentos realizados em laboratório sugerem que plumas de hidrocarbonetos apresentem alta resistividade elétrica, as análises de campo representam o contrário: a pluma é caracterizada por menores resistividades. Os fatores que ocasionam essa diferença entre a resistividade esperada (alta) e a observada (baixa) em campo são diversos, como efeitos da biodegradação, variações climáticas (chuvas e temperatura), heterogeneidades do subsolo, movimentos (tanto laterais como verticais) do LNAPL e da água subterrânea, bem como o tempo de permanência do contaminante no local (Sauck et al., 1998; Sauck et al., 2000; Atekwana et al., 2000; Marques, 2007).

As variações de resistividade e IP (polarização induzida) de materiais arenosos e argilo-arenosos quando saturados por contaminantes derivados de hidrocarbonetos foram estudadas em tanques contendo esses sedimentos (Braga e Cardinali, 2005). Com o uso da eletrorresistividade (com as técnicas da sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico), estes autores procuraram padrões de variabilidade nas propriedades elétricas, a fim de se encontrar semelhanças com estudos reais de contaminação de solo e água subterrânea. A

resistividade dos sedimentos aumentou significativamente após a introdução do contaminante, ao passo que a cargabilidade (IP) diminuiu (Braga e Cardinali, 2005). Passando-se um período de seis meses, os valores de resistividade eram menores, ao ponto de os sedimentos serem mais condutivos que seu entorno (Braga e Cardinali, 2005). Gallas et al. (2011), empregando IP, resistividade e SP (self potential – potencial espontâneo) em local contaminado por efluentes provenientes de um lixão (Lixão do Alvarenga), mostram que o IP e a resistividade têm comportamento semelhante – ambos são inversamente proporcionais à concentração de poluentes.

Os ensaios executados por Braga e Cardinali (2005) com as técnicas de sondagem elétrica vertical e caminhamento elétrico identificaram perfeitamente o contaminante - gasolina. Assim, evidencia-se a importância do fator tempo na análise de vazamentos derivados de hidrocarbonetos.

Os processos de biodegradação têm sido apontados como os principais responsáveis por essa mudança nos valores de resistividade (Atekwana et al., 2000; Cassidy et al., 2001; Werkema et al., 2003). Seja sob condições aeróbicas ou anaeróbicas, a biodegradação dos LNAPLs pode mudar a biogeoquímica da água subterrânea (Cassidy et al., 2001), o que provoca o aumento da condutividade elétrica. Essa mudança ocorre, pois durante o processo de biodegradação são liberados CO_2 e ácidos orgânicos, que afetam a dissolução mineral (Cassidy et al., 2001). A variação do valor esperado de resistividade e o observado, portanto, pode se relacionar ao grau de degradação atingido pelo contaminante (Braga et al., 2008).

O tempo necessário para que ocorra essa degradação deve se relacionar à quantidade de oxigênio disponível, portanto ao grau de aeração do solo (Braga et al., 2008), visto que experimentos em laboratório evidenciam tempo de degradação menor na superfície do solo (contato com atmosfera, mais oxigênio) em relação às porções mais profundas. Isso porque no horizonte seco as trocas gasosas são feitas diretamente com a atmosfera e, em regiões profundas esse transporte depende da água, sendo repostado por absorção de forma mais lenta (Braga et al., 2008). Ademais, a biodegradação de contaminantes tem sua eficiência dependente de uma conjunção de fatores, como condições adequadas de pH, Eh, receptores elétricos (SO_4^{-2} , O_2 , Fe_3^+ , NO_3^- , Mn_4^+), baixos teores de contaminação e temperatura (Moreira et al., 2006).

Na prática, conforme constata-se na bibliografia sobre o tema, alguns trabalhos associam baixas resistividades à contaminações antigas de hidrocarbonetos e outros, o contrário. Em geral, vazamentos recentes deverão apresentar resistividades altas, e em vazamentos antigos a resistividade deverá ser baixa (Braga & Cardinali, 2005). No presente

caso, as anomalias de baixas resistividades encontradas estão correlacionadas às contaminações.

Por fim, pode-se ponderar acerca de qual das técnicas de remediação seria mais adequada a este caso. Levando em consideração a efetividade do método e condições orçamentárias, procedimentos como remediação natural e biorremediação são indicados, pois envolvem custos operacionais baixos e a tecnologia necessária a sua implementação é mais acessível do que a utilizada em técnicas como *pump and treat*. O uso de processos oxidativos avançados pode ser associado ao uso da biorremediação, desde que a tecnologia correta para sua implementação esteja disponível e não cause um incremento excessivo aos custos.

6.1. Fotografias das escavações realizadas / presença de tanques

As escavações realizadas posteriormente e baseadas exclusivamente neste levantamento geofísico confirmaram a presença de tanques enterrados bem como as contaminações por hidrocarbonetos em suas imediações. As fotografias apresentadas (Figuras 6.1. a 6.3.), tiradas após as escavações, confirmam o sucesso dos ensaios geofísicos realizados.



Figura 6.1. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.



Figura 6.2. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.



Figura 6.3. Tanques enterrados indicados pelas setas em amarelo.

7. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados apresentados, o trabalho obteve o sucesso esperado, o que é corroborado pelas escavações efetuadas, que localizaram os tanques enterrados e delimitaram a área atingida pelos poluentes.

Os contrastes das resistividades indicaram que as zonas contaminadas estão correlacionadas às baixas resistividades.

Os locais contaminados e/ou tanques enterrados – são identificados pelas cores avermelhadas nas seções/pseudo-seções e pelos retângulos de padrão hachurado em vermelho. Nas figuras dos mapas e blocos 3D as zonas contaminadas são definidas em dois padrões: curva de isovalores em vermelho delimita as resistividade menores que $30 \Omega.m$ – locais certamente contaminados – e a curva em azul as resistividades entre $30 \Omega.m$ e $75 \Omega.m$ – locais possivelmente contaminados.

Como visto nas seções, mapas e blocos 3D de resistividade modelada, verifica-se que a porção contaminada vai até uma profundidade de 5m, eventualmente até 7m, de acordo com o visualizado nas figuras 5.11 e 5.12.

Os limites laterais da pluma são interpretados pela linha tracejada em azul na porção WSW (esquerda) das figuras 5.9 a 5.12. Outros locais (ENE) de baixas resistividades vistos

nestas figuras devem ser atribuídos a outras causas que não a presença de hidrocarbonetos contaminantes, provavelmente causas litológicas naturais.

Assim, os resultados obtidos com os trabalhos geofísicos permitiram uma delimitação tridimensional da zona contaminada, além de detectar com segurança os locais dos tanques em subsuperfície.

Finalmente, neste trabalho são indicadas sugestões de remediação que poderão ser aplicadas na área. A escolha pela melhor técnica de remediação depende de fatores diversos como orçamento e tecnologia disponíveis.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis - ANP (Brasil). (2015). Anuário estatístico brasileiro do petróleo, gás natural e biocombustíveis. Rio de Janeiro, 249p.
- American Petroleum Institute - API. (2004). API Interactive LNAPL Guide V. 2.0.4. Acesso em 17 de agosto de 2017, <<http://api-ep.api.org/environment/index.cfm>>
- Andreozzi, R., D'Apuzzo, A., Marotta, R. (2002). Oxidation of aromatic substrates in water/goethite slurry by means of hydrogen peroxide. *Water Research*, 36(19), 4691-4698.
- Atekwana, E.A., Sauck, W.A., Werkema Jr, D.D. (2000). Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. *Journal of Applied Geophysics*, 44, 167-180.
- Azambuja, E., Costa, A. F. U., & Nanni, A. S. (1999). O emprego da prospecção geofísica na avaliação de plumas de contaminação por hidrocarbonetos. *IV Congresso Brasileiro de Geotecnica Ambiental*, 2-4. São Paulo.
- Braga, A.C.O., Cardinali, M.T. (2005). Aplicação da resistividade e cargabilidade em estudos de contaminação de sedimentos por derivados de hidrocarbonetos. *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(2), 181-190.
- Braga, A.C.O., Moreira, C.A., Cardinali, M.T. (2008). Variação temporal da resistividade elétrica em contaminação por gasolina. *Revista Geociências*, 27(4), 517-525.
- Campos Neto, M.C. (2000). Orogenic Systems From Southwestern Gondwana: an Approach to Brasiliano-Pan African Cycle and Orogênic Collage in Southeastern Brazil. In: Cordani U.G., Milani E.J., Thomaz Filho A., Campos D.A. (eds.) *Tectonic Evolution of South American*. In: *International Geological Congress*, 31, 335-365. Rio de Janeiro.
- Carle, D. (2016). *Water and the California Dream: Historic Choices for Shaping the Future*. Counterpoint.
- Carneiro C.D.R., Hasui Y., Dantas A.S.L. (1984). Contribuição ao Estudo da Litoestratigrafia do Grupo São Roque na Faixa Jaraguá-Cristais-SP. *Congresso Brasileiro de Geologia*, 33, 3212-3226. Rio de Janeiro: SBG.
- Cassidy, D.P., Werkema Jr, D.D., Sauck, W., Atekwana, E., Rossbach, S., & Duris, J. (2001). The effects of LNAPL biodegradation products on electrical conductivity measurements. *Journal of Environmental & Engineering Geophysics*, 6(1), 47-52.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB.(1999). Manual de gerenciamento de áreas contaminadas - Métodos Geofísicos. 13p. Acesso em 13 de setembro de 2017, <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/sites/45/2013/11/6200.pdf>>
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo - CETESB. Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. (2001). Acesso em: 24 de agosto de 2017, <<http://areascontaminadas.cetesb.sp.gov.br/manual-de-gerenciamento/>>

- Corseuil, H.X., Marins, M.D.M. (1997). Contaminação de águas subterrâneas por derramamentos de gasolina: o problema é grave. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2(2), 50-54.
- Coutinho, J.M.V. (1972). Petrologia do pré-Cambriano em São Paulo e arredores. *Boletim IG*, 3, 05-99.
- Darley de Lima, S., de Oliveira, A.F., Golin, R., Caixeta, D.S., de Lima, Z.M., de Moraes, E.B. (2017). Gerenciamento de áreas contaminadas por postos de combustíveis em Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 12(2).
- Edwards L.S. (1977). A modified pseudo-section for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, 3, 78–95.
- Gallas, J. D. F. (2000). *Principais métodos geoeletricos e suas aplicações em prospecção mineral, hidrogeologia, geologia de engenharia e geologia ambiental*. Tese (Doutorado). Rio Claro: Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP. 174p.
- Gallas, J. D. F., Taioli, F., & Malagutti Filho, W. (2011). Induced polarization, resistivity, and self-potential: a case history of contamination evaluation due to landfill leakage. *Environmental earth sciences*, 63(2), 251-261.
- Geotomo Software. (2010). Manual RES2DINV vers. 3.59. Malásia, 151p.
- Golden Software Inc. (2002). Surfer User's Guide. Colorado, Estados Unidos, 664p.
- Guiguer, N. (1996). Poluição das águas subterrâneas e do solo causada por vazamentos em postos de abastecimento. Ontario: Waterloo Hydrogeologic.
- Hasui, Y. (1975). Geologia da folha de São Roque. *Boletim IG*, 6, 157-183.
- Henrique-Pinto, R., Janasi, V. A. (2010). Metaconglomerados e rochas associadas do Grupo São Roque a norte da cidade de São Paulo, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(3), 409-425.
- Henrique-Pinto, R. (2012). *Proveniência e Ambiente de Sedimentação do Grupo São Roque com Base na Química de Rocha Total e Datação U-Pb de Zircões Detríticos*. Tese (Doutorado). São Paulo: Universidade de São Paulo, 96 p.
- Henrique-Pinto, R., Janasi, V.A., Carvalho, B. B., Calado, B. de O., & Grohmann, C. H. (2014). Integrated geological map of the São Roque Domain, North of São Paulo City – Brazil. *Journal of Maps*, 10(3), 434–439. <https://doi.org/10.1080/17445647.2014.883338>
- IPT. (2014). Gerenciamento de áreas contaminadas. São Paulo, 398p.
- Juhasz, A.L., Naidu, R. (2000). Bioremediation of high molecular weight polycyclic aromatic hydrocarbons: a review of the microbial degradation of benzo [a] pyrene. *International biodeterioration & biodegradation*, 45(1), 57-88.
- Marengo, J.A., Nobre, C.A., Seluchi, M.E., Cuartas, A., Alves, L.M., Mendiando, E.M., Sampaio, G. (2015). A seca e a crise hídrica de 2014-2015 em São Paulo. *Revista USP*, (106), 31-44.

- Marques, S.G. (2007). *Metodologia Geofísica para Contaminação por Hidrocarbonetos - Estudo de Caso em Posto de Combustíveis*. Dissertação (Mestrado). São Paulo: Instituto de Geociências, USP, 98p.
- Menezes, A.M., Moreira, C.A., Ilha, L.M., Schweig, C. (2011). Estudo geofísico de vazamento de combustíveis em posto de abastecimento. *Revista Geociências*, 30(4), 601-609.
- Moreira, C.A., Dourado, J.C. (2005). Análise de contaminantes de fase líquida não aquosa (NAPLs) por aplicação do método eletromagnético indutivo (EM). *Revista Brasileira de Geofísica*, 23(3), 213-220. <https://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2005000300001>
- Moreira, C.A., Dourado, J. C., & Braga, A.C.D.O. (2006). Aplicação da técnica de caminhamento elétrico em área contaminada por derivados de petróleo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 24(3), 383-392.
- Newell, C.J., Acree S.A., Ross R.R., Huling, S.G. (1995). Light Nonaqueous Phase Liquids. *Ground Water Issue*, 25.
- Nockolds, S.R. (1954). Average chemical composition of some igneous rocks. *Bulletin of the Geological Society of America*, 65(10), 1007-1032.
- Oliveira, M.A.F., Melo R.P., Nardy A.J.R., Arab P.B., Trindade I. (2008). New U/Pb Palaeoproterozoic Zircon Age For The Cajamar Metabasite, São Roque Group, Central Ribeira Belt, Southeastern Brazil. *South American Symposium on Isotope Geology*, 6, 1-4.
- Orellana, E. (1972). Prospección geoelectrica en corriente continua. Madri: Paraninfo.
- Organização das Nações Unidas - ONU. (2003). Water for People Water for Life: the United Nations World Water Development Report. Barcelona: Beghahn Books.
- Sauck, W.A., Atekwana, E.A., & Nash, M.S. (1998). High conductivities associated with an LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 2, 203-212.
- Sauck, W.A. (2000). A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. *Journal of Applied Geophysics*, 44(2), 151-165.
- Telford, W. M., Geldart, L. P., Sheriff, R. E. (1990). Applied geophysics. Cambridge university press, 770p.
- Tiburtius, E. R. L., Peralta-Zamora, P., Leal, E. S. (2004). Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados. *Química Nova*, 27(3), 441-446.
- Werkema, D.D., Atekwana, E.A., Endres, A.L., Sauck, W.A., Cassidy, D.P. (2003). Investigating the geoelectrical response of hydrocarbon contamination undergoing biodegradation. *Geophysical Research Letters*, 30(12), 12p.
- Wiedemeier, T.H., Swanson, M.A., Wilson, J.T., Kampbell, D.H., Miller, R.N., Hansen, J.E. (1996) Approximation of Biodegradation Rate Constants for Monoaromatic Hydrocarbons (BTEX) in Ground Water. *Ground Water Monitoring and Remediation*, 186-194.

ANEXO

Tabela para produção dos Mapas

X	Y	R1	R2	R3	R4	R5	LINHAS
6	-4	186,62	32,96	25,4			LINHA A
10	-4	64,59	99,51	164,28	90,15		
14	-4	33,74	122,73	166,52	116,6	65,78	
18	-4	55,97	10,76	17,32	51,38	95,89	
22	-4	185,75	38,8	21,77	181,13	618,88	
26	-4	177,94	13,87	23,67	380,86	1630,7	
30	-4	62,7	34,62	113,18	645,8	1048,1	
34	-4	63,8	106,05	125,63	112,94	99,92	
38	-4	71,93	220,81	271,66	215,54	138,67	
42	-4	61,5	451,16	569,6	1202,1	523,42	
46	-4	49,63	320,95	423,46	368,59	78,16	
50	-4	75,74	58,72	142,23	114,98		
54	-4	135,82	149,95	127,3			
6	0	133,77	50,02	103,4			LINHA B
10	0	45,62	197,3	166,34	157,51		
14	0	11,24	97,62	137,57	146,2	161,37	
18	0	73,67	34,18	43,91	95,55	86,93	
22	0	95,88	38,66	57,23	119,02	73,8	
26	0	146,73	11,81	46,43	165,96	102,48	
30	0	33,47	385,96	421,85	330,16	174,21	
34	0	53,42	339,68	354,85	236,1	136,25	
38	0	56,96	451,68	385,89	228,07	161,82	
42	0	106,38	332,03	275,94	195,51	166,76	
46	0	162,11	90,98	155,64	199,9	252,4	
50	0	124,43	234,62	277,57	209,13		
54	0	119,17	83,39	105,1			
6	4	54,07	139,96	261,52			LINHA C
10	4	36,82	167,97	148,31	218,22		
14	4	22,46	30,2	40,15	66,53	92,77	
18	4	41,11	18,17	49,31	77,13	43,37	
22	4	47,2	152,44	230,7	170,81	55,53	
26	4	111,43	152,49	291,41	224,86	88,29	
30	4	134,54	79	144,27	159,25	98,38	
34	4	132,47	244,79	320,67	259,97	217,71	
38	4	97,26	351,15	476,65	339,61	303,97	
42	4	63	652,02	603,72	387,42	357,98	
46	4	66,21	125,25	105,75	136,85	328,62	
50	4	245,35	35,48	22,37	25,21		

54	4	677,2	22,57	15,19			
6	8	73,74	130,73	190,6			LINHA D
10	8	41,23	191,38	234,16	251,3		
14	8	9,26	15,3	100,62	185,92	265,37	
18	8	16,91	19,04	117,81	191,86	245,76	
22	8	75,27	304,43	284,05	246,31	242,51	
26	8	93,67	276,29	271,66	198,75	144,57	
30	8	74,62	97,26	99,14	80,41	50,56	
34	8	129,14	225,15	186,47	114,91	48,03	
38	8	174	88,07	142,33	223,53	175,02	
42	8	301,54	57,05	118,99	267,93	252,09	
46	8	110,07	33,47	134,65	189,84	23,92	
50	8	75,9	114,69	169,38	96,56		
54	8	31,99	265,88	159,45			
6	12	196,13	377,97	262,63			LINHA E
10	12	34,19	28,11	38,31	98,47		
14	12	15,94	20,45	36,55	46,41	40,04	
18	12	36,85	116,17	214,14	179,39	78,95	
22	12	83,57	228,82	344,54	273,9	163,01	
26	12	150,7	104,09	222,85	205,79	135,05	
30	12	127,94	83,09	82,28	89,39	91,17	
34	12	67	26,23	49,01	108,49	208,18	
38	12	68,21	492,41	459,05	362,07	392,88	
42	12	31,96	180,34	286,4	266,54	336,31	
46	12	62,82	26,31	27,36	43,56	129,07	
50	12	164,98	115,53	31,51	25,86		
54	12	228,35	18,35	19,35			
6	16	69,39	64,98	85,47			LINHA F
10	16	47,6	444,56	493,21	378,51		
14	16	62,67	5,86	48,69	283,42	262,83	
18	16	27,08	49,91	48,34	179,47	381,74	
22	16	39,2	326,29	378,12	362,43	471,63	
26	16	63,83	441,8	372,15	300,26	419,29	
30	16	177,92	56,22	63,98	106,12	246,52	
34	16	165,98	36,67	74,51	187,01	350,69	
38	16	103,13	72,65	122,02	229,55	326,18	
42	16	39,72	333,15	314,17	234,88	210,55	
46	16	35,59	46,85	60,14	54,7	27,38	
50	16	242,07	54,62	30,9	20,97		

54	16	485,9	125,36	24,12			
6	20	63,16	45,04	89,53			LINHA G
10	20	125,8	472,61	407,01	283,48		
14	20	33,45	58,4	236,5	324,38	366,86	
18	20	40,06	66,23	201,52	312,64	473,18	
22	20	50,62	126,98	152,13	223,88	426,45	
26	20	96,65	43,36	64,84	135,6	341,92	
30	20	50,41	168,83	282,95	296,17	381,79	
34	20	32,37	55,76	145,18	208,99	297,36	
38	20	42,74	25,49	64,3	155,55	252,66	
42	20	38,19	263,56	318,9	292,94	283,74	
46	20	57,87	43,15	97,79	121,87	63,36	
50	20	64,63	80,33	86,44	71,43		
54	20	126,3	82	66,15			
6	24	51,45	84,38	130,71			LINHA H
10	24	56,19	399,91	338,59			
14	24	16,07	112,26	195,3			
18	24	27,35	20,92	115,25			
22	24	68,7	120,12	238,51			
26	24	99,81	63,76	127,18			
30	24	114,64	89,85	154,61			
34	24	62,79	40,31	61,22			
38	24	28,79	154,8	111,13			
42	24	26,66	260,94	184,31			
46	24	29,99	46	42,87			
50	24	217,1	10,73	20,05			
54	24	53,64	93,95	50,44			