



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

FABÍOLA MAGALHÃES DE ALMEIDA

**ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM
POSTOS DE SERVIÇOS DO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA- PA
UTILIZANDO GEORADAR**

**BELÉM-PARÁ,
2007**

FABÍOLA MAGALHÃES DE ALMEIDA

**ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM
POSTOS DE SERVIÇOS DE ABAETETUBA-PA UTILIZANDO
GEORADAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará - UFPA em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientador: José Gouvêa Luiz .

**BELÉM-PARÁ,
2007**

FABIÓLA MAGALHÃES DE ALMEIDA

**ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM
POSTOS DE SERVIÇOS DO MUNICÍPIO DE ABAETETUBA-PA
UTILIZANDO GEORADAR**

**Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Geofísica da Universidade
Federal do Pará, para obtenção do título de
Mestre em Geofísica.**

**Área de Concentração
Métodos Elétricos e Eletromagnéticos**

BANCA EXAMINADORA:


UFPA Dr. José Gouvêa Luiz - Orientador


UFPA Dr. Marcos Welby Corrêa Silva


UFC Dr. Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco

À Deus, força maior...

À minha mãe, Rosângela Magalhães de Almeida,
pessoa mais importante da minha vida!

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por minha saúde, pelo amparo e pela força interior nos momentos difíceis em que pensei em desistir.

À Universidade Federal do Pará, através do Programa de Pós-Graduação em Geofísica que tornou possível a realização de meu curso de mestrado, à Agência Nacional do Petróleo (ANP), pela concessão da bolsa de mestrado, ao meu orientador, Prof. Dr. José Gouvêa Luiz, pelos ensinamentos, pela paciência no momento em que mais precisei e pela orientação e ao coordenador do PRh – 06, Prof. Dr. André Andrade, pela paciência e conversas que sempre me davam força para ir em frente.

Agradeço ao Prof. Dr. Om Prakash Verma (*in memoriam*), que nos fez “morrer” de medo nas aulas e voltar no tempo com sua rigidez, mas que no fundo era uma pessoa maravilhosa e engraçada e a todos os professores do Programa de Pós Graduação em Geofísica que contribuíram com esta etapa da minha vida;

Ao meu avô, Luiz Ribeiro de Almeida, aos meus pais Luiz Ribeiro de Almeida Filho e Rosângela Magalhães de Almeida e as minhas Janaína Almeida, Thaís Almeida e Ravindra Almeida, pela dedicação, pelo carinho e pela importância que me dedicam.

Ao meu tio, Rubilar Rodrigues Magalhães (*in memoriam*) por me levar para fisioterapia todos os dias, durante a minha doença, à minha amiga Érika, que me provou sua amizade, preocupação e cumplicidade, além de ter sido responsável por muitos momentos de descontração no curso, à Joyce, pela presença e dedicação nos momentos importantes, aos amigos Marina, Desaix, José e Andrei, pela amizade e por serem pessoas especiais para mim e à aluna de graduação de Geofísica Danusa Mayara, pelo apoio nos trabalhos de campo e pela amizade.

À Benildes, minha mãe da Geofísica, pelo carinho, conversas e ajuda nos momentos necessários, ao Alberto, responsável pelo Laboratório de Instrumentação, pelo esclarecimento de dúvidas e pelas longas conversas e ao técnico em geofísica, Paulo Magalhães, pelo apoio nos trabalhos de campo dessa pesquisa.

A todos aqueles que direta ou indiretamente tenham contribuído para a realização desta dissertação, o meu muito obrigado.

“Não basta somente o conhecimento da ciência,
quando não se conhece a profundidade da própria
alma a ponto de não saber sentir”

Fabíola Magalhães de Almeida

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados de um levantamento Geofísico utilizando o método Radar de Penetração de Solo (GPR) ou Georadar para detectar possíveis zonas de contaminação provocadas por vazamentos de derivados de hidrocarbonetos em postos de serviços da região urbana do município de Abaetetuba, no estado do Pará. A metodologia foi aplicada em postos de serviços porque eles constituem uma das principais fontes potenciais urbanas de contaminação do solo e de aquíferos rasos por combustíveis. Conceitos básicos sobre a contaminação por derivados do petróleo e sua interação com o subsolo são apresentados, juntamente com os princípios básicos que permitem o entendimento do funcionamento do método GPR para o problema abordado. Durante o trabalho, foram realizadas medidas do nível de água em poços rasos, visando a elaboração de um mapa de fluxo subterrâneo. A interpretação geofísica foi auxiliada pelo conhecimento do comportamento do fluxo hídrico subterrâneo local, que mostra o sentido de movimentação da provável contaminação. A correlação entre os dados de GPR, os dados de fluxo e as informações sobre o histórico dos postos levaram a classificá-los em suspeitos de produzir contaminação e possivelmente contaminados.

Palavras-chave: Radar de Penetração de Solo. Contaminação. Combustível. Abaetetuba-Pa.

ABSTRACT

The work presents the results of a geophysical survey using the Ground Penetrating Radar (GPR) method to detect possible zones of contamination caused by derivatives of hydrocarbons in service stations of the urban region of the city of Abaetetuba, in the state of Pará. The methodology was applied in service stations because they are the main potential source of soil and ground water contamination by fuel in the cities. Basic concepts about oil and contamination and its interaction with the ground are presented, together with the basic principles that allow the understanding of the GPR method as applied to the addressed problem. During the work, the depth to the water table was measured to construct an underground flow map. The geophysical interpretation was assisted by the knowledge of the local underground water flow that gives indication on the direction of contamination movement. The correlation of the GPR data with the underground flow and the information about the stations history allowed to classify them as suspected of producing contamination and possibly contaminated.

Keyword: Ground Radar Penetrating. Contamination. Fuel. Abaetetuba-Pa.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 4.1 – Diferentes fases presentes na zona não saturada sem contaminação (A) e zona saturada com a presença do contaminante(B).....	28
Figura 4.2 – Meio saturado poroso sem a presença de hidrocarbonetos (A), e com a presença de hidrocarbonetos (B).....	31
Figura 4.3 – Curvas de permeabilidade relativa para a água e o NAPL.....	34
Figura 4.4 – Transporte do LNAPL na zona não saturada sem passar para a franja capilar.....	37
Figura 4.5 – Esquema do comportamento das fases dos hidrocarbonetos no solo e água subterrânea.....	39
Figura 4.6 – Depressão do nível de água subterrânea resultando grande frente de LNAPL (A) e elevação do nível d'água (B).....	40
Figura 4.7 – Comportamento das diferentes fases dos hidrocarbonetos derivados de petróleo em um meio com camadas de diferente condutividade hidráulica.....	41
Figura 4.8 - Espalhamento de hidrocarbonetos devido a flutuações do nível freático.....	42
Figura 6.1 - Bloco diagrama simplificado de um sistema GPR simples.....	54
Figura 6.2 – (A) Relação entre velocidade e freqüência a diferentes condutividades, e (B) relação entre atenuação e freqüência a diferentes condutividades.....	59
Figura 6.3 – Os três modos de operação GPR: (A) <i>off-set comum</i> , (B) <i>WARR</i> , e (C) <i>CMP</i>	60
Figura 7.1 – Município de Abaetetuba inserido na Mesorregião Nordeste do Estado do Pará e Microrregião de Cametá.....	64
Figura 7.2 - Mapa da Rede de Drenagem da região de Barcarena-Abaetetuba/PA.....	69
Figura 7.3 – Mapa Geológico de Abaetetuba/PA.....	73
Figura 8.1 - Cadastramento de poços em Abaetetuba/PA.....	75
Figura 8.2 – Medida de nível estático em Abaetetuba/PA.....	75
Figura 8.3 - Mapa de localização dos poços cadastrados na sede de Abaetetuba/PA.....	76
Figura 8.4 – Mapa de Profundidade do Nível Estático de Aquíferos Superiores da região central de Abaetetuba/PA.....	83
Figura 8.5 – Mapa de Fluxo Subterrâneo para o Aquífero Superior na região central de Abaetetuba/PA.....	86

Figura 9.1 – Mapa Urbano de Abaetetuba.....	89
Figura 9.2 – Mapa de localização dos postos de serviços de Abaetetuba.....	91
Figura 9.3 – Levantamento GPR realizado paralelo às bombas de combustíveis.....	100
Figura 9.4 – Levantamento GPR realizado perpendicular aos tanques subterrâneos de combustíveis.....	101
Figura 9.5 – Planta esquemática do posto Central com a localização dos perfis GPR. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.....	105
Figura 9.6 – Radargrama do perfil 7 onde observa-se uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por todo perfil, seguida por uma camada com boa reflexão e por bolsões de zonas de baixa reflexão.....	107
Figura 9.7 – Radargrama do perfil 8 mostrando a presença de uma zona baixa reflexão intensa que se estende por todo perfil.....	107
Figura 9.8 – Perfil 9 realizado no posto Central, mostrando zonas de baixa reflexão próximas aos refletores dos tanques.....	109
Figura 9.9 – Perfil 10 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão bem próximas aos refletores dos tanques.....	109
Figura 9.10 – Perfil 11 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a variação vertical da camadas e a presença de zonas de baixa reflexão.....	110
Figura 9.11 – Perfil 12 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão.....	110
Figura 9.12 – Planta esquemática do posto Carvalho I mostrando a localização dos perfis GPR realizados. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.....	113
Figura 9.13 – Perfil 17 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando a variação vertical da camadas e a presença de bolsões de baixa reflexão.....	114
Figura 9.14 – Perfil 18 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão no domínio na camada de boa reflexão.....	114
Figura 9.15 – Perfil 19 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando zonas de baixa reflexão.....	115
Figura 9.16 – Perfil 20 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando zonas de baixa reflexão na forma de bolsões ocorrendo ao redor dos tanques.....	116
Figura 9.17 – Perfil 20 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando bolsões de baixa reflexão ocorrendo ao redor dos tanques.....	116

Figura 9.18 – Planta esquemática do posto São Paulo com a localização dos perfis GPR. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.....	119
Figura 9.19 – Perfil 1 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio da camada de boa reflexão.....	120
Figura 9.20 – Perfil 3 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando os bolsões se zonas características de contaminação pó derivados de petróleo.....	120
Figura 9.21 – Perfil 4 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio das zonas de baixa reflexão.....	122
Figura 9.22 – Perfil 5 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio das zonas de baixa reflexão próximo aos refletores de tanques de gasolina.....	122
Figura 9.23 – Perfil 6 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando bolsões de zonas de baixa reflexão próximo aos refletores de tanques de gasolina.	123
Figura 9.24 – Planta esquemática do posto Carvalho III com a localização dos perfis GPR.	125
Figura 9.25 – Perfil 22 realizado no posto Carvalho III, mostrando uma zona de baixa reflexão provavelmente provocada por fatores naturais.....	126
Figura 9.26 – Perfil 23 realizado no posto Carvalho III, mostrando zonas de baixa reflexão na forma de bolsões.....	126
Figura 9.27 – Perfil 24 realizado no posto Carvalho III, mostrando o contraste lateral entre a zona de baixa reflexão e camada de boa reflexão.....	128
Figura 9.28 – Perfil 25 realizado no posto Carvalho III, mostrando os refletores de tanque em meio a zonas de baixa reflexão.....	128
Figura 9.29 – Perfil 26 realizado no posto Carvalho III, mostrando zonas de baixa reflexão próximas aos refletores de tanques.....	129
Figura 9.30 – Planta esquemática do posto Carvalho II, com a localização dos perfis GPR, onde as setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.....	130
Figura 9.31 – Perfil 13 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.....	132
Figura 9.32 – Perfil 14 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.....	132
Figura 9.33 – Perfil 15 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.....	133
Figura 9.34 – Perfil 16 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.....	133

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Composição média da gasolina.....	21
Tabela 4.1 – Valores típicos de condutividade hidráulica (K) para os solos.....	32
Tabela 4.2 – Capacidade de retenção de óleo em solos não saturados.....	32
Tabela 5.1 - Padrão de potabilidade para consumo humano de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.....	49
Tabela 6.1 - Constante dielétrica (K), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) e atenuação (α) típicas de alguns materiais.....	58
Tabela 7.1 - Coluna Estratigráfica Regional.....	71
Tabela 8.1 – Principais características dos poços cadastrados na área.....	77
Tabela 8.2 – Características Gerais dos Sistemas Hidrogeológicos da Área.....	79
Tabela 9.1 – Características dos poços de serviços da área urbana de Abaetetuba.....	93
Tabela 9.2 – Características dos poços de serviços da área urbana de Abaetetuba observadas no levantamento de campo.....	95
Tabela 9.3 – Características dos perfis GPR realizados na área dos postos de serviços de Abaetetuba.....	102
Tabela 9.4 – Tabela mostrando um resumo dos resultados finais do trabalho.....	135

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	METODOLOGIA	18
3	COMPOSTOS DE HIDROCARBONETOS	20
3.1	PETRÓLEO BRUTO.....	20
3.2	DERIVADOS DE PETRÓLEO.....	21
3.2.1	Composição da Gasolina	21
3.2.1.1	A Gasolina e o Meio Ambiente.....	22
3.2.2	Composição do Óleo Diesel	22
3.2.2.1	O Óleo Diesel e o Meio Ambiente.....	23
3.2.3	Principais Diferenças entre a Gasolina e o Óleo Diesel	23
3.3	PROPRIEDADES DOS COMPONENTES DOS HIDROCARBONETOS.....	24
3.3.1	Solubilidade	24
3.3.2	Pressão de Vapor	24
3.3.3	Densidade	25
3.3.4	Coefficiente de Partição octanol-água	25
3.3.5	Tensão Interfacial	25
3.3.6	Viscosidade Dinâmica	26
3.3.7	Ponto de Ebulição	26
4	COMPORTAMENTO DOS HIDROCARBONETOS NO MEIO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO	27
4.1	FATORES DO MEIO FÍSICO QUE AFETAM O FLUXO E O TRANSPORTE DOS CONTAMINANTES.....	27
4.1.1	Grau de Saturação	29
4.1.2	Saturação Residual	30
4.1.3	Permeabilidade Relativa	32
4.2	MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CONTAMINANTES.....	34

4.2.1	Advecção	34
4.2.2	Dispersão	35
4.2.3	Atenuação	35
4.3	O TRANSPORTE DO LNAPL.....	36
5	CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS	43
5.1	DEFINIÇÕES IMPORTANTES PARA O ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO.....	43
5.2	FASES DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS.....	45
5.3	CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS ATRAVÉS DE POSTOS DE SERVIÇOS.....	46
5.4	PROBLEMAS GERAIS OCACIONADOS POR ÁREAS CONTAMINADAS.....	47
5.5	CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS E OS RISCOS À SAÚDE.....	48
6	METODOLOGIA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS	50
6.1	GEORADAR (GROUND PENETRATING RADAR – GPR).....	52
6.1.1	Princípios Básicos Sobre GPR	53
6.1.2	Modos de Aquisição de Dados	58
6.1.3	Processamento dos Dados	59
7	O MUNICÍPIO DE ABAETETUBA	63
7.1	CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS DE ABAETETUBA.....	63
7.1.1	Clima	65
7.1.2	Fisiografia	65
7.1.2.1	Solo.....	65
7.1.2.2	Relevo.....	68
7.1.2.3	Vegetação.....	68
7.1.2.4	Hidrografia.....	68
7.1.3	Contexto Geológico	70
8	HIDROGEOLOGIA DA ÁREA	74

8.1	BANCO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS.....	74
8.2	SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS.....	74
8.3	ANÁLISE GERAL DESSES SISTEMAS NO CONTEXTO DA ÁREA ESTUDADA.....	79
8.4	SUSCEPTIBILIDADE A CONTAMINAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS....	79
8.5	ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NO CONTEXTO DA ÁREA.....	80
8.6	FLUXOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS.....	81
8.6.1	Metodologia para a Construção do Mapa de Fluxo.....	82
8.6.2	Interpretação dos Resultados.....	82
8.6.2.1	Comportamento do Nível Estático na Área de Estudo.....	82
8.6.2.2	Comportamento do Fluxo Subterrâneo na Área de Estudo.....	85
9	LEVANTAMENTO COM GPR EM POSTOS DE SERVIÇOS DA REGIÃO URBANA DE ABAETETUBA.....	88
9.1	POSTOS DE SERVIÇOS DA REGIÃO URBANA DE ABAETEUBA.....	88
9.2	COLETA DE DADOS COM GPR.....	100
9.3	ANÁLISE DOS DADOS DE GPR NOS POSTOS DE SERVIÇOS DE ABAETETUBA.....	101
9.3.1	Postos Possivelmente Contaminados.....	104
9.3.2	Postos Suspeitos de Contaminação.....	117
9.4	RESULTADOS FINAIS.....	134
10	CONCLUSÃO.....	136
	REFERÊNCIAS.....	138

FABÍOLA MAGALHÃES DE ALMEIDA

**ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS EM
POSTOS DE SERVIÇOS DE ABAETETUBA-PA UTILIZANDO
GEORADAR**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará - UFPA em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Elétricos e Eletromagnéticos.

Orientador: José Gouvêa Luiz .

**BELÉM-PARÁ,
2007**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)
Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

- Almeida, Fabíola Magalhães de
- A447e Estudo da contaminação por hidrocarbonetos em Postos de Serviços do município de Abaetetuba-Pa utilizando Georadar / Fabíola Magalhães de Almeida; Orientador, José Gouvêa Luiz. – 2007
142 f. : il.
Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2007.
1. Radar de Penetração de Solo. 2. Contaminação. 3. Combustível. 4. Abaetetuba (PA) I.Universidade Federal do Pará II. Luiz, José Gouvêa, Orient. III. Título.

CDD 20º ed.:622.098115

1 INTRODUÇÃO

O contato de derivados de petróleo com o meio físico pode afetar diretamente a população, oferecendo riscos à segurança das pessoas e propriedades, além de riscos à saúde pública e aos ecossistemas. A principal fonte causadora desse contato são os vazamentos de combustíveis que podem ocorrer nos tanques de armazenamento presentes nos postos de serviços.

O vazamento de combustíveis pode ocorrer por diversos fatores, tais como: um derramamento durante a operação de transferência de produto para o tanque; vazamentos no sistema devido à corrosão; falhas estruturais do tanque ou da tubulação conectada ao tanque ou mesmo por sua instalação inadequada, gerando assim riscos de incêndios, explosões e contaminação do solo, subsolo e da água subterrânea.

No Pará, existem 1.128 postos de combustíveis cadastrados na Agência Nacional do Petróleo-ANP, os quais podem provocar impacto sobre os recursos hídricos, principalmente envolvendo águas subterrâneas, sobretudo quando não são locados levando em consideração os devidos critérios. Apesar de não se ter idéia da magnitude do problema dessa contaminação, sabe-se que muitos tanques têm mais de 25 anos de uso. Portanto, o risco de ocorrerem vazamentos é extremamente grande, principalmente pelo surgimento de rachaduras ou corrosões nos tanques submersos.

A detecção da contaminação torna-se assim muito importante, a fim de que se tomem providências para contê-la, evitando seu espalhamento no ambiente, bem como sejam iniciados os procedimentos de limpeza do subsolo. Dentre a metodologia empregada na detecção da contaminação, a geofísica tem mostrado resultados muito bons, como pode ser constatado em Pedrosa (2004), Dehaini (2001), Sauck, Atekwana e Nash (1998), Atekwana, Sauck e Werkema Jr. (1998) e Sauck (1999).

Os métodos elétricos e eletromagnéticos são os métodos geofísicos que melhor resposta têm apresentado nesse tipo de problema. A presença dos combustíveis na subsuperfície tanto pode ser detectada por causar aumento como redução na resistividade elétrica do ambiente. Logo ao chegar ao ambiente, eles causam um aumento na resistividade, já que, por serem compostos orgânicos, apresentam elevada resistividade. Com o passar do tempo, a ação de bactérias produz a bio-degradação

dos combustíveis com a formação de ácidos que tornam o ambiente menos resistivo (SAUCK, 2000).

Neste trabalho foi usado o método eletromagnético Radar de Penetração no Solo (Ground Penetrating Radar-GPR), que tem mostrado excelentes resultados quando o ambiente contaminado apresenta baixa resistividade, como pode ser observado nos trabalhos de Pedrosa (2004) e Sauck, Atekwana e Nash (1998).

O método foi empregado para identificar áreas sujeitas à contaminação, ou já contaminadas por combustíveis provenientes de postos de serviços na região urbana do município de Abaetetuba-PA.

O trabalho teve como objetivos principais identificar áreas sujeitas à contaminação por combustíveis e delimitar plumas de espalhamento do contaminante no subsolo, para assim, apontar as áreas de maior risco ambiental.

O tema em questão é considerado de grande importância nas demais regiões brasileiras, principalmente nas regiões Sudeste e Nordeste, onde as pesquisas encontram-se muito desenvolvidas. Na região Amazônica, esse tema é pouco trabalhado o que, provavelmente, torna este trabalho pioneiro no assunto.

O trabalho foi financiado pela Agência Nacional do Petróleo – ANP.

2 METODOLOGIA

A seqüência de atividades que foram adotadas para a realização desta dissertação partiu de estudos geofísicos, geológicos e hidrogeológicos da região. No sentido de atingir os objetivos delineados anteriormente, foi feito um amplo levantamento dos dados disponíveis sobre o assunto na literatura, além de pesquisas sobre postos de serviços cadastrados na área urbana do município de Abaetetuba.

Para delinear as características dos postos de serviços existentes na área, foram enviadas solicitações para os órgãos competentes tais como ANP e CREA/PA. A partir delas se conseguiu um cadastro com informações valiosas sobre estes postos de combustíveis, tais como: endereço, bandeira e nome do posto.

A seqüência metodológica adotada encontra-se descrita pelos tópicos a seguir:

1- Pesquisa bibliográfica: Foi a fase inicial, porém foi utilizada ao longo de todo o trabalho. Esta fase consiste de um amplo estudo da bibliografia, enfatizando trabalhos elaborados sobre o tema de estudo, que contemplassem os aspectos fundamentais da pesquisa, além de trabalhos da mesma linha na área.

2- Coleta de informações técnicas: Nesta fase foram estabelecidos contatos com empresas do setor público e privado, visando à obtenção de informações referentes e verídicas para a realização deste trabalho tais como: nome e endereço dos postos, ano de implantação do posto e tipos de produtos comercializados pelos postos a serem investigados.

3- Trabalhos cartográficos: Para a confecção dos mapas, os arquivos *shape files* foram tratados utilizando-se de programas de geoprocessamento. Para a elaboração do mapa de fluxo e do bloco diagrama também utilizou-se de programas computacionais.

4- Tratamento e Processamento dos Dados: Esta etapa constituiu da sistematização das informações adquiridas ao longo das fases anteriores. As informações coletadas foram tratadas e tabeladas para melhor análise e todos os dados plotados em base cartográfica. Foram construídos croquis para todos os postos de serviços onde, observa-se, a disposição dos perfis GPR.

5- Trabalhos de Campo: Nesta fase foram realizadas quatro campanhas de campo, para os diversos levantamentos temáticos: medidas de nível em poços, tubulares e amazonas, localizados nas proximidades dos postos de serviços; checagem de todas as informações coletadas nos órgãos competentes; levantamento das características dos postos de serviços e aplicação da metodologia geofísica Georadar (GPR), utilizando uma antena monoestática de 400MHz nos postos da área.

6- Processamento dos Dados de GPR: Nesta fase foram processados os perfis de GPR realizados na área dos postos de serviço da região urbana de Abaetetuba. Para esse processamento utilizou-se o programa RADAM 5.0.

7- Análise e Interpretação dos Resultados: Foram feitas, nesta fase, análises e a interpretação dos resultados obtidos nas fases anteriores, incluindo todos os perfis GPR; o comportamento do fluxo hídrico subterrâneo e os aspectos ambientais de vulnerabilidade da área.

8 - Conclusões e Elaboração do Texto Final: Esta fase consistiu da elaboração das principais conclusões de todo o estudo e na redação de um texto técnico/explicativo, onde se determinará se os postos de serviço em análise apresentam ou não qualquer tipo de contaminação por derivados de petróleo.

3 COMPOSTOS DE HIDROCARBONETOS

Segundo Fetter (1993) existe uma série de produtos que são compostos por hidrocarbonetos, estes vão desde o petróleo bruto até seus derivados mais comuns gasolina e diesel que são objetos deste trabalho.

3.1 PETRÓLEO BRUTO

O petróleo bruto é constituído principalmente de uma mistura de hidrocarbonetos e minoritariamente por compostos heteroatômicos Caputo (2005). Ele contém uma mistura complexa de compostos orgânicos, na maior parte alcanos e hidrocarbonetos aromáticos, com pequenas quantidades de compostos como oxigênio, nitrogênio e enxofre.

Em geral todas as formas do petróleo são compostas quase que exclusivamente por átomos de carbono e de hidrogênio, com menores proporções de nitrogênio e oxigênio. O metano (CH_4) é a menor molécula de carbono e a maioria dos hidrocarbonetos comuns, são de baixo peso molecular (CAPUTO, op. cit.).

A fonte primária de aproximadamente quase todos os derivados de petróleo é o óleo cru, este consiste de uma mistura de hidrocarbonetos de peso molecular variável e, na média, contém aproximadamente 84,5% de carbono, 13% de hidrogênio, 1,5% de enxofre, 0,5% de nitrogênio e 0,5% de oxigênio. Existem mais de 600 compostos de hidrocarbonetos identificados no petróleo (FETTER, 1993).

Segundo Caputo (2005), o petróleo é refinado através da destilação fracionada a partir das moléculas menores que são mais leves, até as mais longas. Dependendo de suas características, demandará além de destilação fracionada, o craqueamento ou craqueio, que utiliza catalisadores químicos ou hidrogênio na quebra de moléculas.

A maioria dos óleos brutos não contém concentrações abundantes de hidrocarbonetos aromáticos, isto é, BTEX (benzeno, tolueno, etil-benzeno e xilenos), pois estes são produzidos durante o processo de destilação e são associados aos produtos de petróleo refinados como gasolina, diesel e querosene (FETTER, op. cit.).

3.2 DERIVADOS DO PETRÓLEO

Sabe-se que a gasolina e o óleo diesel são os derivados de petróleo mais comuns na sociedade atual, uma vez que esses elementos são normalmente vendidos em postos de serviços de todos os centros urbanos do Brasil e do mundo, tendo uma importância grande na indústria automotiva.

O processamento inicial de beneficiamento do óleo envolve sua separação por destilação em várias frações caracterizadas pelos intervalos de temperatura e pressão. Além da destilação, numerosos processos de refinaria são utilizados para otimizar a obtenção de certos produtos desejados. A gasolina é produto de uma combinação de numerosos fluxos de refinamento e vários aditivos são utilizados para obter o critério de melhor desempenho dos motores (DEHAINI, 2001).

Cerca de 20% do petróleo processado no Brasil é convertido em gasolina e 36% em óleo diesel (MME-DNC, 1995).

3.2.1 Composição da Gasolina

Segundo Ferreira e Zuquette (1998), a gasolina pode ser entendida como sendo uma mistura complexa de hidrocarbonetos hidrofóbicos relativamente voláteis. Esses compostos são os alifáticos (alcanos, cicloalcanos, alquenos) e aromáticos.

A gasolina comercializada no Brasil, segundo os dados da REGAP (Refinaria de Gabriel Passos), possui a composição apresentada na tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Composição média da gasolina.

Hidrocarbonetos	Peso%	Hidrocarbonetos	Peso%
Saturados		Aromáticos	
Naftaleno	25,52	Oxigenados	15,86
Parafinas Iso	14,20	Metanol	0,64
Parafinas Normais	17,65	Etanol	0,45
Não Saturados		t- Butano	0,13
Naftaleno	3,61	MTBE	13,69
Parafinas Iso	0,25	Polinaftaleno	0,19
Parafinas Normais	1,79	C11	6,03

Fonte: Fetter (1993).

3.2.1.1 A Gasolina e o Meio Ambiente

O comportamento da gasolina no meio ambiente vai depender dos seus constituintes e de suas características físico-químicas, porém como medida de precaução e com a pretensão de reduzir a poluição atmosférica são adicionados oxigenados como éteres, álcoois e MTBE (metil-terc-butil éter) na sua composição. Entre esses produtos está o etanol, que age como cossolvente, permitindo assim uma maior solubilidade dos compostos benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno (BTEX) na água, aumentando a sua dissolução e dispersão pelo solo e aquíferos.

O maior problema da contaminação por gasolina está relacionado com hidrocarbonetos aromáticos, dentre os quais se destacam benzeno, tolueno, etil-benzeno e xileno, que constituem o chamado BTEX. Os compostos aromáticos (BTEX e outros alquilbenzenos) perfazem cerca de 10 a 59% da gasolina, enquanto que os hidrocarbonetos alifáticos compreendem 41 a 62%. Os hidrocarbonetos aromáticos são geralmente mais tóxicos que os compostos alifáticos com o mesmo número de carbonos e possuem maior mobilidade em água, em função da sua solubilidade em água ser da ordem de 3 a 5 vezes maior.

Hidrocarbonetos aromáticos têm também maior mobilidade em sistemas solo-água, característica que pode ser representada significativamente pelo menor coeficiente de partição entre octanol-água. Um menor coeficiente de partição implica em uma lenta absorção no solo e, conseqüentemente, um transporte preferencial via água. Além de migrarem mais rapidamente através das águas atingindo mananciais de abastecimento, os compostos aromáticos apresentam uma toxicidade crônica mais significativa do que os hidrocarbonetos alifáticos.

3.2.2 Composição do Óleo Diesel

O óleo diesel ou diesel, outro derivado comum de petróleo é composto por hidrocarbonetos de cadeias simples, não ramificadas, predominantemente, hidrocarbonetos alifáticos contendo de 9 a 28 átomos de carbono na cadeia. Porém em sua composição é encontrado o composto benzeno, que apresenta alta toxicidade, podendo causar o câncer.

O diesel contém ainda outros compostos que porventura destilam na mesma faixa de temperatura, tais como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos e seus derivados alquílicos. Outra característica importante do diesel é o alto teor de enxofre, que varia de 0,1 a 0,5%.

Para se referir à qualidade do diesel como combustível, utiliza-se como parâmetro o número de cetana, que é similar ao número de octana, para a gasolina esse valor é de 33,34. Comercialmente, a composição do diesel varia muito, devido as diferentes origens do petróleo utilizado como matéria-prima e aos diferentes processos de refino.

3.2.2.1 O Óleo Diesel e o Meio Ambiente

Embora o volume de óleo diesel consumido no país seja quase o dobro do volume consumido de gasolina, este é considerado um combustível menos preocupante em termos ambientais, devido à sua menor mobilidade no meio poroso e por possuir os compostos tóxicos citados acima em menor quantidade na sua composição, se comparado com as quantidades encontradas na gasolina (OLIVEIRA et al, 1990).

Segundo Dehaini (2001), a composição relativa do produto deve mudar drasticamente depois de liberado para o ambiente. Os principais processos responsáveis por essa mudança são volatilização, dissolução e degradação biológica. Cada processo influencia em maior e menor grau alguns constituintes químicos ou grupo de constituintes, e as taxas de transformação, é função das condições ambientais.

3.2.3 Principais Diferenças entre a Gasolina e o Óleo Diesel

As principais diferenças entre gasolina e diesel são o tamanho das cadeias, o número de carbonos existentes na estrutura, o peso molecular, a pressão de vapor e a menor quantidade de hidrocarbonetos aromáticos (BTEX).

Além disso, durante o processo de produção, o diesel é destilado em temperaturas na faixa de 433 a 683 K, enquanto que a gasolina destila na faixa de 353 a 393 K.

3.3 PROPRIEDADES DOS COMPONENTES DOS HIDROCARBONETOS

As propriedades físico-químicas dos componentes dos hidrocarbonetos são responsáveis pelo comportamento dos produtos individuais dos mesmos e das misturas no ambiente. Essas propriedades têm a função de governar a partição, o tipo de transporte e o destino destes contaminantes (FERREIRA; KUQUETTE, 1998).

Assim o estudo dessas propriedades torna-se fundamental para o entendimento do comportamento dos combustíveis no subsolo.

3.3.1 Solubilidade

A solubilidade controla a quantidade de soluto que pode sofrer partição na fase aquosa e ser transportada em solução. Para compostos puros, a solubilidade em água é função do tipo de estrutura molecular e das características eletroquímicas. Para misturas de orgânicos como a gasolina, a solubilidade é função da fração molar de cada constituinte individual da mistura. A solubilidade dos compostos orgânicos decresce com o aumento do peso molecular. A presença de outros compostos orgânicos co-dissolvidos na água pode afetar a solubilidade total do produto orgânico de interesse (FETTER, 1993). Os compostos de maior solubilidade são os que compõem o BTEX.

3.3.2 Pressão de Vapor

A pressão de vapor é um parâmetro que pode ser utilizado para estimar a tendência de um composto, presente na fase adsorvida ou na fase aquosa, sofrer volatilização e partição para a fase gasosa. Quanto maior a pressão de vapor, mais volátil é a substância (FERREIRA; KUQUETTE, op. cit.). A pressão total de vapor dos

constituintes da gasolina varia muito. Os constituintes mais leves, como o isobutano, apresentam volatilidade e pressão de vapor maiores (GUIGUER, 2000).

3.3.3 Densidade

A densidade varia com as interações entre as substâncias, a estrutura molecular e o peso molecular. A principal razão de se conhecer a densidade de uma substância é determinar se esta flutuará sobre a água (densidade $< 1,0 \text{ g/cm}^3$) ou se mesclará com a água (densidade $> 1,0 \text{ g/cm}^3$) (FERREIRA; KUQUETTE, 1998). Quando a densidade é menor que $1,0 \text{ g/cm}^3$ este líquido é conhecido como LNAPL (*Light-Non Aqueous Phase Liquids*), o que se aplica aos hidrocarbonetos derivados de petróleo. Na maioria das vezes, quanto maior for o peso molecular e o grau de halogenação (Cl, Br), maior será a densidade da substância orgânica constituída por hidrocarbonetos.

3.3.4 Coeficiente de Partição octanol-água

O coeficiente de partição octanol-água quantifica a tendência de uma substância orgânica ser dissolvida em água ou em solventes orgânicos. Quanto maior o valor deste coeficiente, maior a tendência do contaminante ser dissolvido em líquidos orgânicos do que em água (FETTER, 1993).

3.3.5 Tensão Interfacial

Um líquido em contato com outra substância, a qual pode ser um sólido, um líquido imiscível ou gás possui energia interfacial; essa energia é numericamente igual à tensão interfacial. Tome-se como exemplo, a tensão interfacial formada entre duas substâncias e um líquido. Esta energia é resultado da diferença no grau de atração entre as moléculas de uma substância e a superfície do líquido comparado com o grau de atração com as moléculas de outra substância e a superfície deste mesmo líquido (FETTER, op.cit.).

3.3.6 Viscosidade Dinâmica

Viscosidade dinâmica é a medida da resistência de um fluído para escoar (GUIGUER, 2000). Quanto mais viscoso for o produto, mais lentamente ele se deslocará em subsuperfície. É influenciada diretamente pela temperatura.

3.3.7 Coeficiente de Difusão

Os compostos orgânicos presentes no solo e água subterrânea apresentam mobilidade segundo um gradiente de concentração que é dirigido do meio mais concentrado para o de menor concentração. Este coeficiente relaciona o fluxo e o gradiente de concentração para uma determinada concentração inicial dentro de um sistema em equilíbrio dinâmico.

4 COMPORTAMENTO DOS HIDROCARBONETOS NO MEIO GEOLÓGICO E HIDROGEOLÓGICO

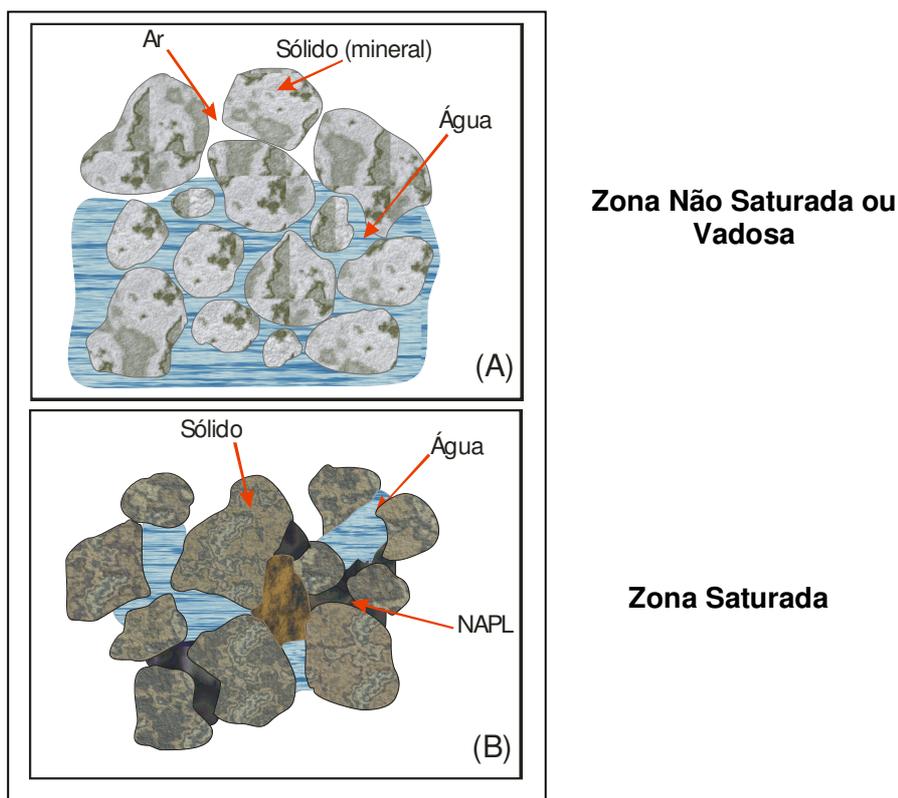
O comportamento dos hidrocarbonetos (contaminante) vai depender de suas características físico-químicas associado às diversas condições dos materiais sólidos que compõem o meio físico, esses fatores são capazes de delinear o comportamento desses elementos quer seja no meio geológico ou hidrogeológico.

4.1 FATORES DO MEIO FÍSICO QUE AFETAM O FLUXO E O TRANSPORTE DOS CONTAMINANTES

Dependendo do tipo de produto e das características do meio físico haverá diferentes possibilidades tanto de infiltração quanto de interação desses contaminantes com as partículas do solo, com a água ou mesmo com microorganismos, os quais muitas vezes atuam como um modo de atenuar essas substâncias.

O movimento de líquidos, que não são miscíveis ou não se misturam com a água encontrada na subsuperfície na zona não saturada ou vadosa e na zona saturada, é uma importante ferramenta do estudo de contaminação hidrogeológica. Na função de contaminantes esses líquidos de fase não aquosa são freqüentemente chamados de NAPLs (*non-aqueous phase liquids*). Os hidrocarbonetos, alvo de nosso estudo, são menos densos do que a água e, portanto, denominados por LNAPL (*light non-aqueous phase liquids*) (MANCINI, 2002).

A Figura 4.1A mostra o sistema trifásico mineral, água e ar que ocorre na zona não saturada e o bifásico mineral e água na zona saturada, pois todo o ar existente nos poros é substituído por água. Nota-se na Figura 4.1B o desenvolvimento de uma terceira fase na zona saturada representada pela presença da fase líquida não aquosa (NAPL) em subsuperfície.



**Figura 4.1 – Diferentes fases presentes na zona não saturada sem contaminação (A) e zona saturada com a presença do contaminante(B).
Fonte: Modificado de (FERREIRA; KUQUETTE, 1998).**

Segundo Ferreira e Zuquette (op.cit.) na zona saturada contaminada com NAPLs podem ocorrer três possíveis fases – sólidos, NAPL e água - , enquanto na zona não saturada, a entrada de NAPL resulta na ocorrência de quatro fases.

As fases que podem estar presentes em um aquífero contaminado são: (1) fase gasosa: contaminantes presentes na fase vapor; (2) fase aquosa: uma parte dos contaminantes pode estar dissolvida na água, dependendo da sua solubilidade; (3) fase imiscível: os contaminantes estão presentes como uma fase imiscível; (4) fase sólida: os contaminantes podem estar adsorvidos na superfície dos sólidos (FERREIRA; KUQUETTE, op.cit.).

As quatro fases podem ou não estar presentes em subsuperfície. No caso de um derrame de NAPL em superfície, a infiltração ocorre primeiramente pela zona não saturada e posteriormente pela zona saturada.

O NAPL na zona não saturada tende a cobrir os grãos com um filme ao redor dos poros. Este filme eventualmente se desenvolve ocupando todos os espaços dos poros, caso haja uma quantidade suficiente de NAPL. Isto ocorre porque dos dois fluidos existentes na zona não saturada (ar e NAPL), o NAPL é o que apresenta maior atração aos sólidos do solo. Esta afinidade é denominada grau de molhabilidade, e refere-se à atração relativa de vários fluidos - ar, água ou NAPL – com os sólidos do solo. O fluido que cobre o grão é chamado fluido molhante, o outro fluido é o não molhante (MANCINI, 2002).

Ferreira e Zuquette¹ (1998 apud MANCINI 2002) fazem a seguinte generalização quanto ao grau de molhabilidade relativa dos fluidos normalmente encontrados em soluções com a água:

- Sistema trifásico compreendendo sólidos inorgânicos (minerais), água e óleo; a água é o fluido molhante e cobre o sólido. Se o ar está presente no lugar do óleo, a água continua sendo o fluido molhante;
- Sistema trifásico compreendendo sólidos (minerais), óleo e ar; o óleo é o fluido molhante. No meio saturado, onde a água e o óleo representam as duas fases fluidas, a água é considerada o fluido molhante;
- Sistema trifásico compreendendo óleo, água e sólidos orgânicos (húmus e turfa); o óleo é considerado o fluido molhante;
- Sistema de quatro fases compreendendo o ar, óleo, água e sólidos orgânicos; o óleo é considerado o fluido molhante.

4.1.1 Grau de Saturação

Dependendo das porcentagens relativas do volume de poros ocupados por diferentes líquidos, o grau de saturação e o coeficiente de permeabilidade do meio poroso serão diferentes do que se os poros fossem ocupados por um único líquido.

¹ FERREIRA, J.; ZUQUETTE, L. V. Considerações sobre as interações entre contaminantes constituídos de hidrocarbonetos e os componentes do meio físico. **Geociências**: São Paulo, n. 2, v. 17, p. 527 – 557. 1998.

Tais diferenças influenciam significativamente o transporte e a distribuição dos NAPLs (MANCINI, 2002).

4.1.2 Saturação Residual

A saturação residual é definida como o volume de hidrocarbonetos (ou qualquer outro tipo de NAPL) armazenado nos poros, em relação ao volume total de poros. Pode ser expressa como:

$$S_r = \frac{V_h}{V_t} \times 100 \quad (1)$$

em que: S_r é a saturação residual, V_h é o volume de poros ocupados pelos hidrocarbonetos e V_t é o volume total de poros.

No contexto da contaminação das águas superficiais, a saturação residual tem sido descrita como o grau de saturação no qual o NAPL torna-se descontínuo e é imobilizado por forças de capilaridade (MERCER; COHEN, 1990).

A porcentagem relativa de silte e argila nas paredes dos poros e a permeabilidade do meio desempenham um papel mais importante do que as propriedades do fluido no controle da saturação residual (HASAN, 1996).

O NAPL comporta-se como um fluido não molhante na maioria dos meios saturados; por isso ele é armazenado no centro dos poros numa situação de saturação insular (Figura 4.2B). Entretanto, na zona não saturada o NAPL comporta-se como o fluido molhante, espalha-se para os poros adjacentes. Este espalhamento resulta em uma redução ao nível de concentração residual à sua situação anterior, significando que uma quantidade maior de NAPL é sorvida na zona não saturada do que na zona saturada.

Os fluidos molhantes tendem a ocupar os pequenos poros (microporos) existentes na massa do solo, enquanto os fluidos não molhantes ocupam os grandes (macroporos). Ferreira e Zuquette (1998) utilizaram o termo saturação residual pendular para se referir ao fluido que fica preso em uma parte estreita nos espaços de ligação entre os poros, por forças de capilaridade (Figura 4.2 A). A saturação insular tende a

ocorrer na forma de bolhas isoladas no centro dos poros. A Figura 4.2 B ilustra o NAPL em meio poroso em uma situação de saturação residual insular.

O volume de solo necessário para sorber um determinado volume de hidrocarboneto líquido pode ser estimado (American Petroleum Institute) utilizando-se a seguinte relação:

$$V_s = \frac{0,2 V_{hc}}{PR_s} \quad (2)$$

em que: V_s é o volume de solo necessário para atingir a saturação residual, V_{hc} é o volume de hidrocarbonetos descarregados, P é a porosidade do solo e R_s é a capacidade de saturação residual.

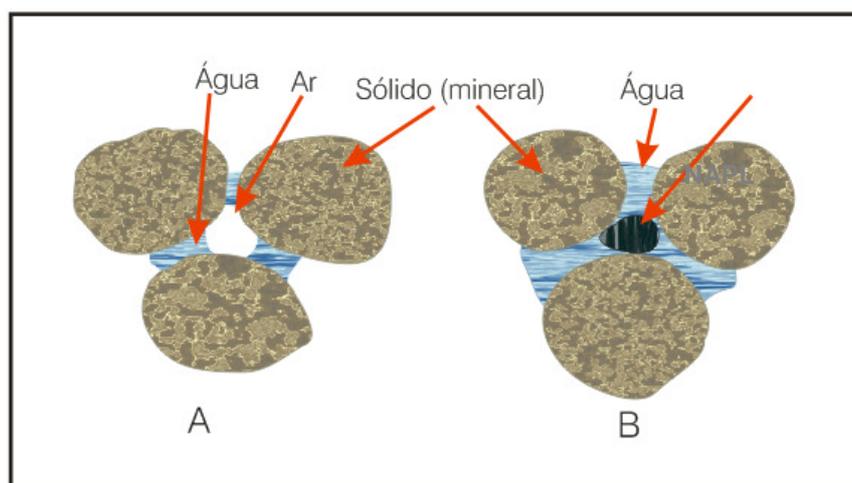


Figura 4.2 – Meio saturado poroso sem a presença de hidrocarbonetos (A), e com a presença de hidrocarbonetos (B).

Fonte: Modificado de (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

Estima-se a profundidade máxima de infiltração de hidrocarbonetos líquidos na zona não saturada, por aproximação, segundo Dietz (1970) e Van Dam (1967), pela expressão:

$$D = \frac{V_s}{A} \quad (3)$$

em que: D é a profundidade máxima de infiltração do hidrocarboneto na zona não saturada. A é a área de infiltração. Nas tabelas 4.1 e 4.2 são apresentados os valores típicos de condutividade hidráulica para solos e a capacidade de retenção em alguns solos.

Tabela 4.1 – Valores típicos de condutividade hidráulica (K) para os solos.

Tipo de Solo	Gasolina (K)	Querosene (K)	Gás/ Óleo leve (K)
Rocha à cascalho grosso	400	200	100
Cascalho à areia grossa	250	152	62
Areia grossa à média	130	66	33
Areia média à fina	80	40	20
Areia fina à siltica	50	25	18

Fonte: Ferreira e Zuquette (1998).

Tabela 4.2 – Capacidade de retenção de óleo em solos não saturados.

Tipo de Solo	Capacidade de Retenção em Óleo (R) – 1/m³
Rocha, areia grossa	5
Cascalho, areia grossa	8
Areia grossa, média	15
Areia média, areia fina	25
Areia fina, silte	40

Fonte: Ferreira e Zuquette (op.cit.).

4.1.3 Permeabilidade Relativa

Em razão do grau de molhabilidade relativa da água e do NAPL, a água forma uma cobertura ao redor dos sólidos enquanto o NAPL ocupa a parte central dos poros. Em tais situações, diferente de um meio comum totalmente saturado por um único

fluido, nem o NAPL nem a água ocupam o volume total dos poros. Isto significa que o coeficiente de permeabilidade do meio poroso em relação a dois líquidos será diferente, menor do que seria em um meio ocupado por um único líquido. Esta redução no coeficiente de permeabilidade é denominada de coeficiente de permeabilidade relativa, e definida como a taxa de permeabilidade para um fluido a uma dada saturação em relação a esta permeabilidade para uma saturação igual a 100%. A permeabilidade relativa situa-se em um intervalo de 1,0 para a completa saturação e 0,0 para não saturado, podendo ser expressa como:

$$K_{ri} = \frac{K_i(S_i)}{K_{si}} \quad (4)$$

sendo: K_{ri} o coeficiente de permeabilidade relativa para o fluido, S_i o volume de poros ocupados pelo fluido i , $K_i(S_i)$ o coeficiente de permeabilidade de um meio para um fluido i em uma saturação S_i , e K_{si} o coeficiente de permeabilidade do meio quando ele está completamente saturado com o fluido i .

Na presença de duas fases, NAPL e água, a permeabilidade zero não necessariamente corresponde a uma saturação de 0%. A Figura 4.3 mostra o coeficiente de permeabilidade de um meio poroso em relação a duas fases líquidas, NAPL e água. Quando o meio está saturado em NAPL, os valores de permeabilidade para o NAPL e para a água são de 1,0 e 0,0, respectivamente.

O aumento contínuo do volume de água nos poros provoca a expulsão do NAPL dos poros devido à imiscibilidade destes dois líquidos, reduzindo a permeabilidade relativa para o NAPL a zero.

O valor de permeabilidade zero não ocorre quando o volume de NAPL nos poros torna-se zero, mas em um nível de saturação residual próxima de zero, correspondente ao ponto S_{rn} . Este ponto é denominado saturação residual do NAPL, e reflete o fato de que num volume de 20% de NAPL nos poros, o coeficiente de permeabilidade relativa para o NAPL é efetivamente zero, o que significa que nestas condições o NAPL é imóvel, favorecendo a sorção.

O coeficiente de permeabilidade relativa para a água é afetado do mesmo modo que para o NAPL: com o aumento da porcentagem do volume de NAPL no volume dos

poros, a permeabilidade relativa para a água diminui, até atingir o ponto S_{iw} , quando o coeficiente de permeabilidade relativa para a água torna-se zero. O ponto S_{iw} é denominado de saturação irreduzível em água, esta torna a água efetivamente imobilizada.

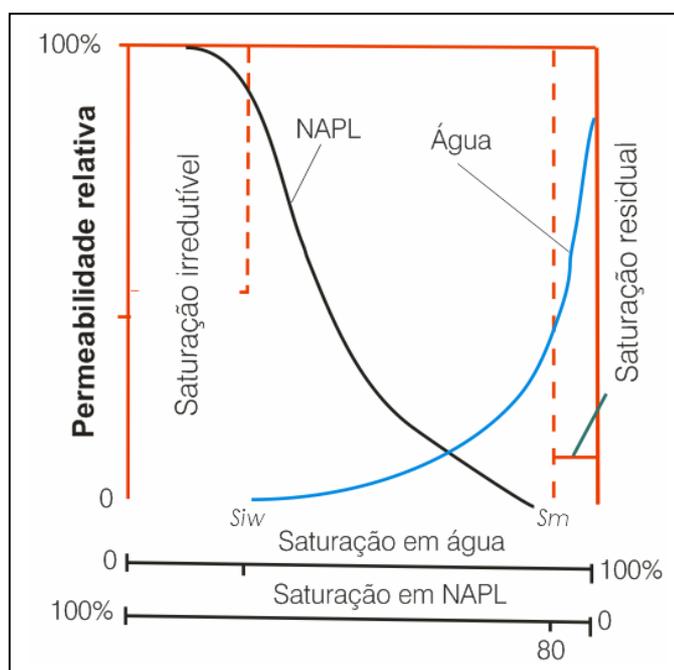


Figura 4.3 – Curvas de permeabilidade relativa para a água e o NAPL.

Fonte: Modificado de (FERREIRA; KUQUETTE, 1998).

4.2 MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CONTAMINANTES

A dinâmica dos contaminantes no solo costuma ser explicada através de três mecanismos de transferência de massa: advecção, dispersão e atenuação. Esses mecanismos encontram-se descritos a seguir, segundo a concepção de Azambuja, Cancelier e Nanni (2002).

4.2.1 Advecção

Consiste no mecanismo onde os contaminantes seguem coincidentemente com os vetores de fluxo e guardam uma relação direta com a velocidade de percolação no

solo. É o mecanismo preponderante na formação e mobilização da fase livre dos hidrocarbonetos.

4.2.2 Dispersão

Consiste no mecanismo responsável pela diminuição da concentração de contaminantes no fluido de percolação e que pode se dar através de dois processos: dispersão hidrodinâmica e difusão molecular. A dispersão hidrodinâmica acontece pela restrição de fluxo nos poros do solo que gera redução de velocidade de percolação dos componentes mais viscosos. A difusão molecular é intrinsecamente, um fenômeno de diluição dos componentes solúveis e é o principal processo formador da fase dissolvida, responsável, pela maior mobilidade dos contaminantes. Quando se tratam de emulsões, como no caso dos hidrocarbonetos, a dispersão pode se apresentar como um mecanismo complexo, em virtude dos fenômenos de histerese do arraste de contaminantes, em especial nas frentes de saturação e franjas capilares. Este processo está associado à formação da fase adsorvida e também pela produção de uma fração de emulsões que podem compor a fase dissolvida.

4.2.3 Atenuação

Consiste na redução de contaminantes transportados pela advecção ou diluição através de reações químicas ou físico-químicas. A atenuação química é mais intensa em solos com maior capacidade de troca catiônica e atua reduzindo componentes das fases livres e adsorvidas. Também nesse elenco de reações estão as reações de bioconversão pela qual, parcelas de hidrocarbonetos são transformadas em ácidos orgânicos ou mesmo totalmente oxidadas. A atenuação química é mais intensa na região com maior disponibilidade de oxigênio e está intimamente ligada à ação biológica. A atenuação físico-química é responsável pela formação da fase adsorvida e consiste no aprisionamento de contaminantes que se aderem aos grãos do solo, sobretudo aos grumos de argila com maior atividade. Entretanto, associada com os mecanismos de atenuação química, é responsável pela formação da fase dissolvida (facilitada pela redução de pH).

4.3 O TRANSPORTE DO LNAPL

Quando ocorrem vazamentos, os LNAPLs migram verticalmente pela zona não saturada sob a influência das forças gravitacional e capilar. Alguma expansão horizontal também ocorrerá devido à atração das forças capilares (DEHAINI, 2001), (Figura 4.4).

O termo forças capilares se refere às forças que influenciam a quantidade de movimento dos hidrocarbonetos em fase líquida pelos interstícios do solo ou espaços vazios. Segundo Guiguer (2000), essas forças dependem:

- de o solo estar molhado com água ou com hidrocarbonetos em fase líquida;
- das propriedades físicas e químicas dos hidrocarbonetos em fase líquida;
- As características do solo.

O transporte do LNAPL através das zonas não saturada e saturada depende da quantidade de LNAPL liberado no meio. Um pequeno volume de LNAPL flui pela zona não saturada até atingir o estado de saturação residual, em razão do desenvolvimento de um sistema de quatro fases como resultado da entrada de LNAPL nesta zona, com a seguinte ordem de grau de molhabilidade: água > LNAPL > ar (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

A água de infiltração dissolve os componentes solúveis presentes no LNAPL, tais como o benzeno, o tolueno e o xileno, e os transporta até a zona saturada. Esses contaminantes formam uma pluma que se distribui por difusão e advecção. Muitas das substâncias tendem a ser voláteis; assim, o gás sofre partição de modo que uma parte fica retida no solo e outra migra para o ar e, serão então, transportados para outras partes do aquífero por difusão molecular (FERREIRA; ZUQUETTE, op.cit.).

Os voláteis movem-se primeiramente pela zona não saturada e finalmente entram na camada superficial do solo onde, dependendo das condições físico-químicas retornam para a fase líquida por condensação. O processo de volatilização, transporte e liquefação provocam o transporte de contaminantes sobre áreas muito extensas (MANCINI, 2002).

Assim, quando um grande volume de LNAPL é liberado, este se desloca no sentido da franja capilar próximo à zona saturada. Os componentes solúveis do LNAPL atravessam adiante ultrapassando os componentes menos solúveis. No topo da franja capilar, onde a água satura um grande volume de poros, o material acumulado causa uma redução na permeabilidade relativa do LNAPL, impedindo de mover-se para baixo, o LNAPL tende a se espalhar sobre o topo da franja capilar (Figura 4.4).

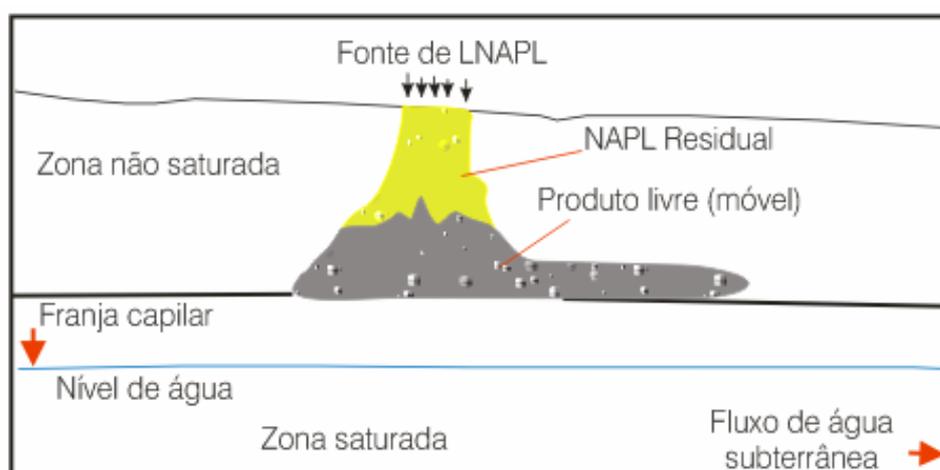


Figura 4.4 – Transporte do LNAPL na zona não saturada sem passar para a franja capilar.

Fonte: Modificado de (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

O acúmulo de um volume suficiente de LNAPL no topo da franja capilar faz com que o mesmo comece a fluir na mesma direção da água subsuperficial (Figura 4.4).

Em razão de sua baixa densidade, os LNAPL's flutuam próximo ao nível da água subsuperficial, na zona de capilaridade. Por causa desses mecanismos alguns produtos tais como a gasolina, querosene e alguns outros óleos, são encontrados como produtos livres sobre o topo da franja capilar (FERREIRA; ZUQUETTE, op.cit.).

Ainda segundo esses últimos autores, os grandes derrames geram um fornecimento contínuo de LNAPL na zona não saturada, favorecendo uma condutividade hidráulica progressiva e contínua e, formando, uma depressão na interface zona saturada – LNAPL, onde os LNAPL's se acumulam (Figura 4.5). No caso de remoção ou esgotamento da fonte de fornecimento, os LNAPL's presentes na zona

não saturada continuam a migrar para níveis mais profundos, estacionando quando a concentração de NAPL's atinge o nível de saturação residual e não pode mais avançar. Caso contrário continua a mover-se para baixo recarregando a depressão localizada sobre o nível da água subsuperficial (Figura 4.6A), produzindo um espalhamento lateral maior sobre a franja capilar.

Quando o suprimento de LNAPL cessa, o volume acumulado mantém o movimento descendente até atingir a saturação residual. A lixiviação do LNAPL existente nas partes superiores da zona não saturada reduz grande parte da frente de contaminação na interface LNAPL – zona saturada, fazendo com que a zona saturada retroceda. Visto que o LNAPL próximo à zona saturada, encontra-se no estado de saturação residual (Fig. 4.6B), o retrocesso da água subsuperficial não consegue deslocar todo o LNAPL (este é relativamente imóvel em virtude da saturação residual). Parte da água de infiltração que migra descendentemente pode dissolver a fase residual, criando uma pluma de contaminação dissolvida na zona saturada.

A água de infiltração superficial (chuva, por exemplo), também pode dissolver os LNAPL's residuais, criando um nível elevado de contaminação do solo (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

A constituição do meio físico é de extrema importância no condicionamento hidrogeológico e conseqüentemente da migração da contaminação. A Figura 4.7 mostra a pluma contaminante sendo barrada por camadas de baixa condutividade, não permitindo que a ocorrência de fase livre sobrenadante ao nível d'água.

O bombeamento da água da zona saturada e as mudanças sazonais também provocam o rebaixamento do nível da água subterrânea. Quando os LNAPL's estão localizados no topo do nível da zona saturada, a depressão associada também causa um novo abaixamento do LNAPL – frente de água subsuperficial.

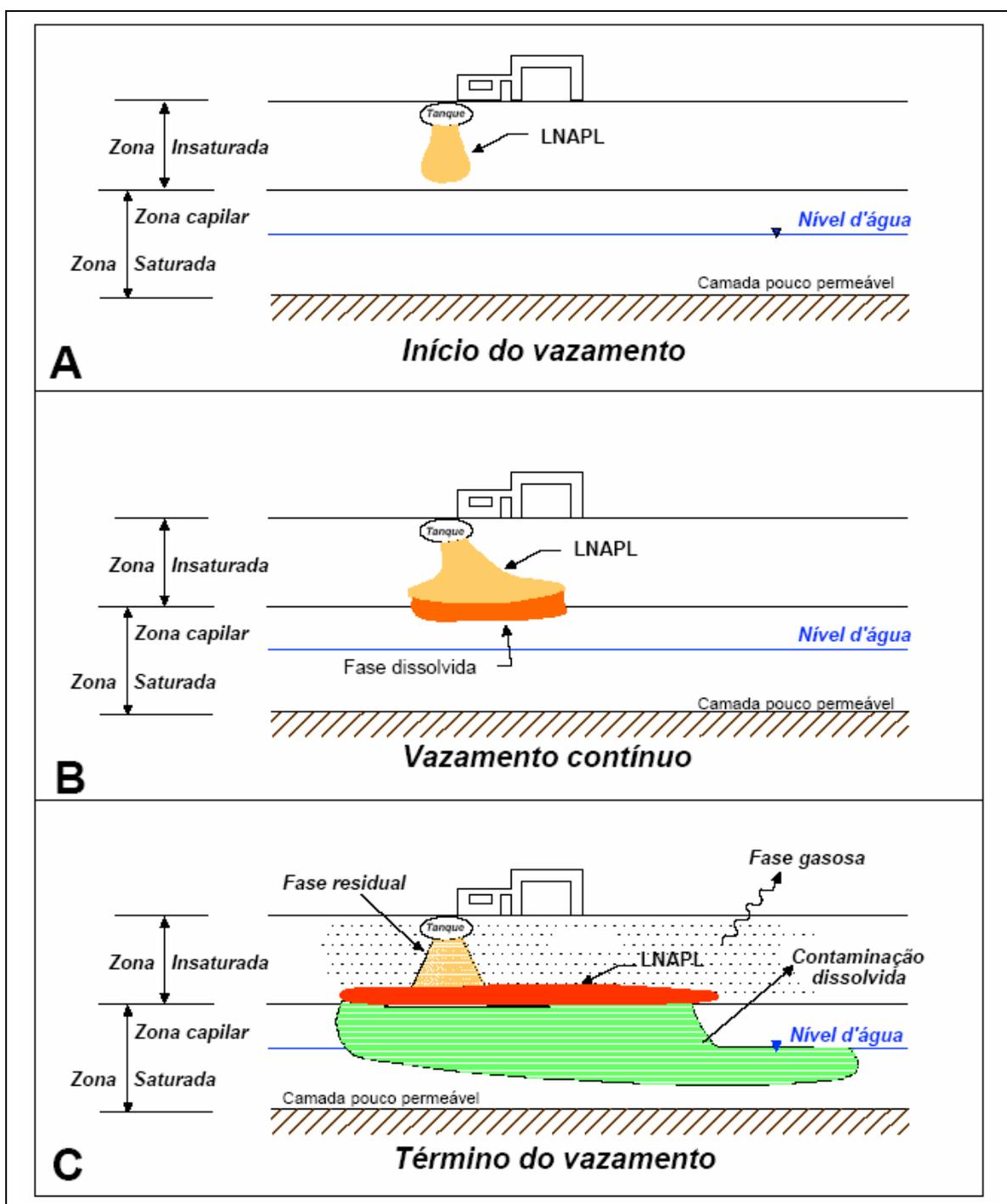


Figura 4.5 – Esquema do comportamento das fases dos hidrocarbonetos no solo e água subterrânea.
 Fonte: Mancini (2002).

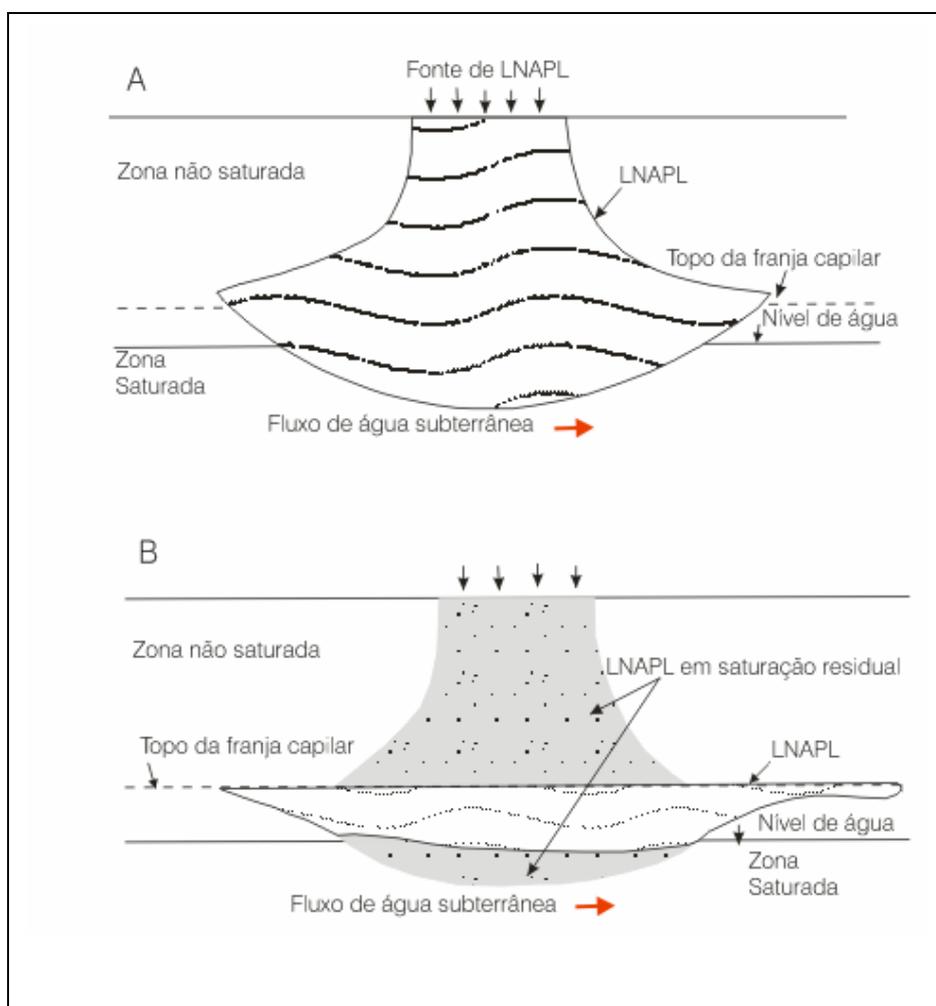


Figura 4.6 – Depressão do nível de água subterrânea resultando grande frente de LNAPL (A) e elevação do nível d'água (B).

Fonte: Modificado de (FERREIRA; ZUQUETTE, 1998).

Quando a zona saturada se eleva devido à recarga ou ao estabelecimento das condições do estado de equilíbrio, parte do LNAPL é empurrado para cima, mas não totalmente; em razão da saturação residual uma parte permanece nos poros abaixo do novo nível da zona saturada. Desta forma os LNAPL's podem ocupar uma grande espessura da zona saturada, devido ao trapeamento nos poros, conforme mostrado anteriormente, o que gera a contaminação de um grande volume de água (Figura 4.8).

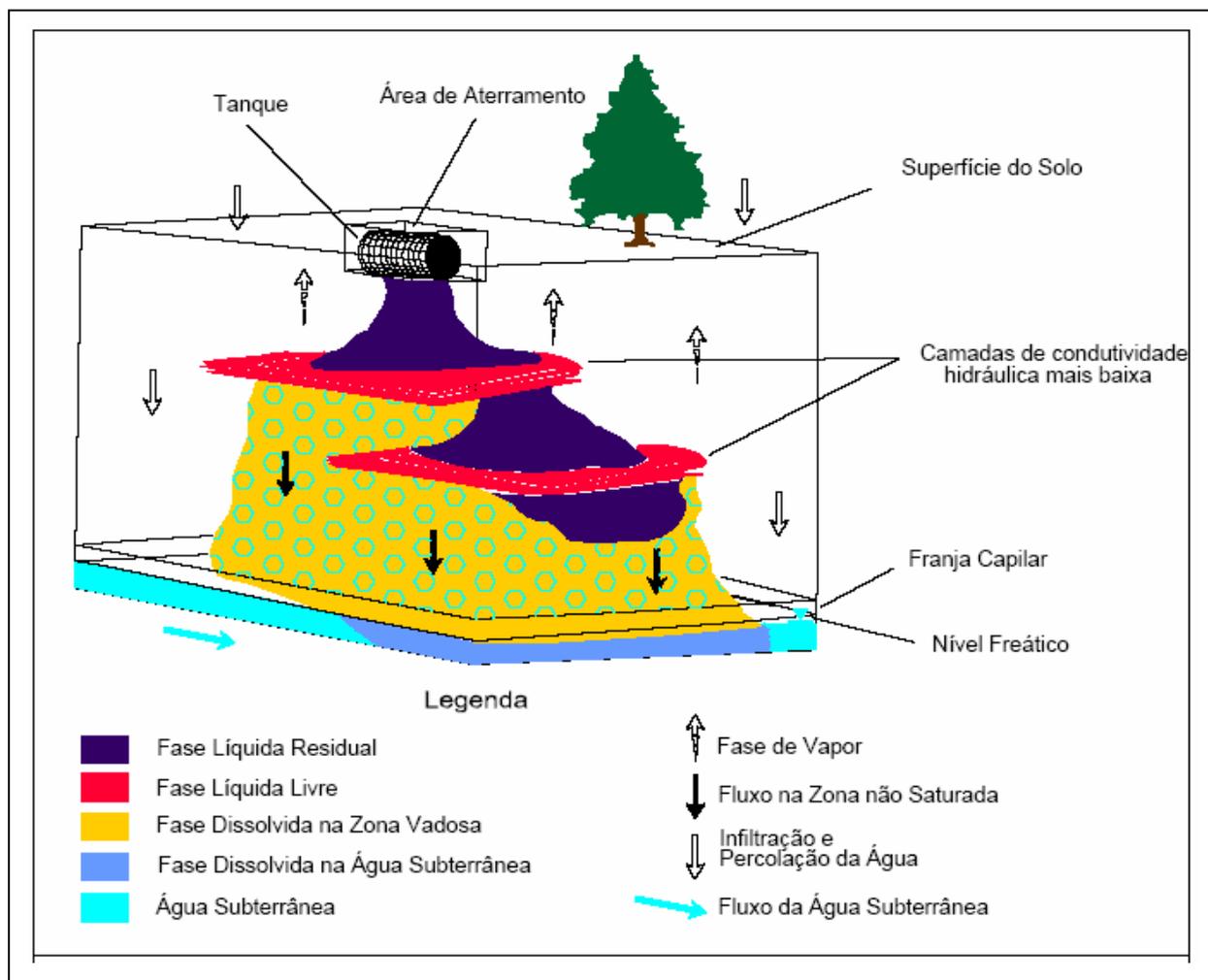


Figura 4.7 – Comportamento das diferentes fases dos hidrocarbonetos derivados de petróleo em um meio com camadas de diferente condutividade hidráulica.
 Fonte: Mancini,2002.

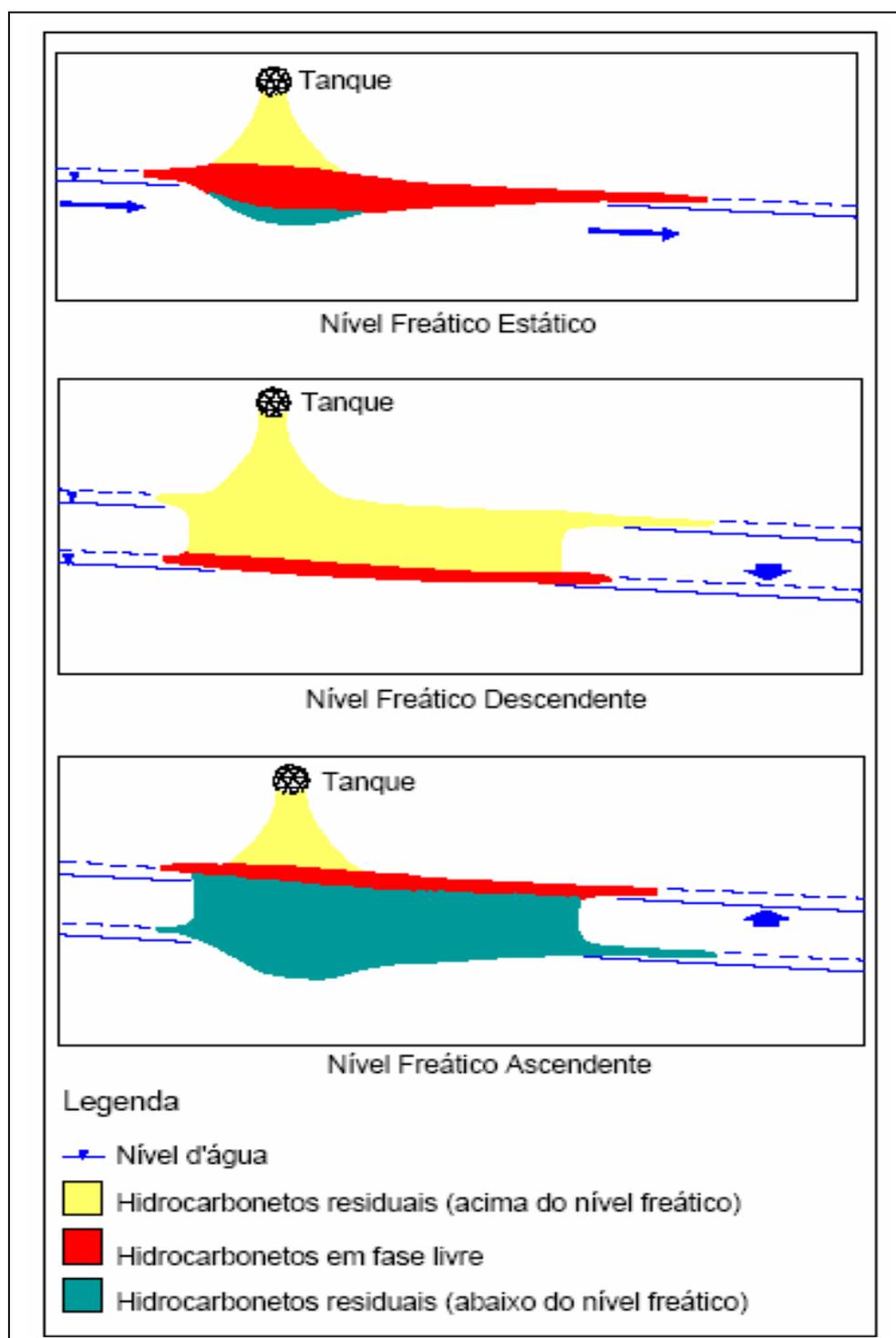


Figura 4.8 – Espalhamento de hidrocarbonetos devido a flutuações do nível freático.

Fonte: Mancini,2002.

5 CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS

Neste capítulo serão abordados os diversos aspectos do tema contaminação do solo por derivados de hidrocarbonetos. Serão apresentados conceitos importantes para o entendimento deste estudo, além de informações sobre os riscos à saúde causados pela contaminação.

5.1 DEFINIÇÕES IMPORTANTES PARA O ESTUDO DA CONTAMINAÇÃO

Para um melhor entendimento da contaminação utilizou-se o “Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas”, publicado no ano de 2001 pela CETESB, que apresenta definições importantes sobre este tema, algumas dessas definições encontram-se descritas a seguir:

Áreas contaminadas (AC) - são áreas onde há comprovadamente poluição causada por quaisquer substâncias ou resíduos que nela tenham sido depositados, acumulados, armazenados, enterrados ou infiltrados, e que determina impactos negativos sobre bens a proteger.

Área Degradada – é uma área onde há ocorrência de alterações negativas das suas propriedades físicas, tais como sua estrutura ou grau de compactidade, a perda de matéria devido à erosão e a alteração de características químicas, devido a processos como a salinização, lixiviação, deposição ácida e a introdução de poluentes.

Área Potencialmente Contaminada (AP) – é uma área onde estão desenvolvidas ou onde foram desenvolvidas atividades potencialmente contaminantes.

Área suspeita de Contaminação (AS) – é uma área na qual, após a realização de uma avaliação preliminar, foram observadas indicações que induzem a suspeitar da presença de contaminação.

Atividade Potencialmente Contaminadora - é aquela em que ocorre o manejo de substâncias cujas características físico-químicas, biológicas e toxicológicas podem acarretar danos aos bens a proteger, caso entrem em contato com os mesmos.

Avaliação de Risco – é o processo pelo qual se identificam e avaliam os riscos potenciais e reais que uma área contaminada pode causar à saúde humana e a outros organismos vivos.

Bens a Proteger – são bens que, segundo a Política Nacional do Meio Ambiente e legislações decorrentes destas, devem ser protegidos. São considerados como bens a proteger:

- Saúde e bem - estar da população;
- Fauna e flora;
- Qualidade do solo, das águas e do ar;
- Interesses de proteção à natureza/paisagem;
- Ordenação territorial e planejamento regional e urbano;
- Segurança e ordem pública.

Contaminação – Introdução no meio ambiente de organismos patogênicos, substâncias tóxicas ou outros elementos, em concentrações que possam afetar a saúde humana. É o caso particular da poluição.

Estudo histórico industrial – Coleta e análise de informações existentes sobre os aspectos operacionais e produtivos, bem como investigações ambientais.

Foco de contaminação (“Hot spot”) – São os pontos, em uma AC, onde são detectadas as maiores concentrações do(s) contaminante(s) de interesse, na maioria das vezes relacionadas à fonte da contaminação.

Poluição – É definida segundo a Lei Federal no 6938/81:

Art. 3º III – “Degradação da qualidade ambiental resultante de atividades que direta ou indiretamente”:

- prejudiquem a saúde, a segurança e o bem-estar da população;
- criem condições adversas as atividades sociais e econômicas;
- afetem desfavoravelmente a biota;
- afetem as condições estéticas ou sanitárias do meio ambiente;

- lancem matérias ou energias em desacordo com os padrões ambientais estabelecidos.

Processo de Identificação de Áreas Contaminadas – É a base do gerenciamento de áreas contaminadas, tendo como objetivo principal a localização das áreas contaminadas.

Risco (Referente a AC's) – É a probabilidade de ocorrência de um efetivo adverso aos bens a proteger em decorrência de sua exposição aos contaminantes presentes em uma AC.

5.2 - FASES DE CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS

Os hidrocarbonetos que constituem os derivados de petróleo ou combustíveis como óleo diesel e gasolina são compostos de baixa densidade e a maioria dos seus componentes consistem de uma fase não solúvel em água.

Geralmente, um vazamento de combustível em um tanque de abastecimento promove diferentes fases de contaminação, conforme relatam Mercer e Cohen (1990). Costa, Azambuja e Nanni (1999), por exemplo, reconheceram cinco fases de contaminação que tipicamente se manifestam em vazamentos de tanques de combustível e que são descritas a seguir:

Fase adsorvida – constitui no halo de dispersão entre a fonte e o nível freático e caracteriza-se por uma fina película de hidrocarbonetos envolvendo grumos de solo ou discontinuidades existentes no saprólito ou rocha, sendo mais importante para os produtos mais viscosos como o diesel;

Fase livre – constitui em um véu não miscível sobre o topo do freático livre e que pode ser mais espesso em casos onde o sistema freático é pouco dinâmico;

Fase dissolvida – constitui em contaminações por dissolução de aditivos polares e por uma fração emulsionada de hidrocarbonetos que possui maior mobilidade e dissipa-se abaixo no nível freático livre, sendo mais importante para fluidos menos viscosos como a gasolina;

Fase vaporizada – constitui uma fase gasosa dos componentes voláteis dos combustíveis e que ocupa vazios do solo ou rocha, sendo mais importante para os hidrocarbonetos de menor ponto de vaporização, como aqueles que compõe a gasolina;

Fase condensada – aparece mais tipicamente em áreas urbanas onde a pavimentação do solo é intensa e pouco permeável, caracterizando-se pela acumulação de produtos condensados sob os pavimentos.

5.3 – CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS ATRAVÉS DE POSTOS DE SERVIÇOS

Nos últimos anos, houve um número significativo de ocorrências de vazamentos de combustíveis, principalmente em tanques de armazenamento subterrâneos (TAS), localizados em postos de serviços, sendo que a gasolina foi o produto de maior ocorrência.

Muitos postos de serviços possuem tanques muito antigos, que estão sujeitos à corrosão e vazamentos, que ocorrem geralmente em vazões reduzidas, e só são percebidas pelo responsável pelo posto quando há uma perda considerável de combustível. O aumento progressivo desses vazamentos reflete o envelhecimento dos TAS instalados, cuja tendência é se agravar futuramente, caso a situação não se altere.

De acordo com estatísticas internacionais, os tanques presentes nos postos de serviços com mais de 20 anos de instalação, podem apresentar problemas de vazamentos devido à sua corrosão (COLE, 1994; BLACKMAN JR., 1996), porém a detecção de vazamentos é extremamente dificultada pela impossibilidade de observação direta dos tanques subterrâneos.

Extensas zonas contaminadas podem se formar no subsolo sem apresentar vestígios contundentes em superfície. O controle de plumas contaminantes de hidrocarbonetos no Brasil é realizado através de poços de monitoramento junto aos tanques de combustível; entretanto, a contaminação do subsolo por hidrocarbonetos ocorre de maneira complexa e diferenciada, o que dificulta a estimativa adequada da

quantidade ou continuidade destes produtos em subsuperfície, com base apenas em dados de poços de monitoramento.

Na maioria dos casos de contaminação por combustíveis em postos de serviços, a preocupação do diagnóstico consiste em delimitar as fases adsorvida e livre, pois estas são as mais importantes no que concerne ao risco ambiental e, além disto, são as fases onde as ações de remediação podem ser mais efetivas (COSTA, AZAMBUJA ; NANNI, 1999).

5.4 - PROBLEMAS GERAIS OCACIONADOS POR ÁREAS CONTAMINADAS

Existem muitos problemas gerados pelas áreas contaminadas por derivados de petróleo. Sanchez (1998) aponta três problemas principais: existência de riscos à segurança das pessoas e das propriedades, riscos à saúde pública e dos ecossistemas, além de restrições ao desenvolvimento urbano e imobiliário das propriedades.

A ocorrência de vazamentos de hidrocarbonetos configura perigo constante de incêndio ou explosão nos locais atingidos. Nos centros urbanos, os casos de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo (TAS) merecem uma atenção especial além daquela dedicada aos solos e águas subterrâneas. A pluma de contaminação poderá percorrer caminhos preferenciais, como tubulações da rede de esgoto, galerias da rede elétrica ou de telefonia, fundações, subsolos de edifícios e garagens subterrâneas (OLIVEIRA, 1992).

Outro problema grave é a contaminação de aquíferos, que é mais preocupante do que a contaminação das águas superficiais, visto que estas rapidamente se renovam e se recuperam após cessar o lançamento de efluentes. No caso da contaminação dos aquíferos freáticos, pode ser tão demorada a recuperação da qualidade que em alguns casos não se consegue atingir os limites permitidos pela legislação. (MANCINI, 2002).

5.5 CONTAMINAÇÃO POR HIDROCARBONETOS E OS RISCOS À SAÚDE

A grande quantidade de postos de serviços nos centros urbanos, a idade ultrapassada dos tanques subterrâneos e a falta de fiscalização, podem estar contribuindo, em muitos locais, de forma lenta, porém significativa para a contaminação do meio ambiente e conseqüentemente para a saúde pública.

Sabe-se, através de diversos estudos, que os principais contaminantes do meio, solúveis em água, são hidrocarbonetos aromáticos, isto é, BTEX (benzeno, tolueno, etilbenzeno e xilenos), que são produzidos a partir do processo de destilação do óleo bruto e são encontrados na gasolina e diesel. O BTEX, por sua vez, tem caráter tóxico e este caráter está relacionado diretamente com o seu potencial carcinogênico e mutagênico ao ser humano.

Investigações ocupacionais em diferentes indústrias mostram que o benzeno desempenha um indubitável papel de risco aos humanos. Gibotti (2000), investigando a poluição de aromáticos no ar, destacam que os hidrocarbonetos aromáticos provocam danos à saúde, principalmente devido à toxicidade e/ou mutagenicidade ou carcinogenicidade do BTEX. Também advertem que a inalação de tolueno ou xilenos pode induzir distúrbios no modo de falar, na visão, audição, no controle dos músculos e outros, além de sugerirem a associação entre benzeno e xileno com o surgimento de tumores cerebrais.

Segundo Tiburtius, Zamora e Leal (2004), a *International Agency for Research on Cancer* (Agência Internacional de Pesquisa de Câncer, da Organização Mundial da Saúde, com sede em Lyon, França) e o *National Institute for Occupational Safety and Health* (Agência Norte-Americana de Saúde e Segurança Ocupacional) incluem o benzeno em suas listas de produtos cancerígenos. Dentre os cânceres, as leucemias são as mais freqüentes e, dentre elas, as mais comuns são as agudas.

No Brasil, a ação cancerígena do benzeno foi também reconhecida oficialmente a partir de 1994, pela portaria da Secretaria de Segurança e Saúde no Trabalho (SSST nº3), de 10 de março de 1994. A sua capacidade em provocar danos cromossômicos e à medula óssea, se ingeridos pelos seres humanos, é comprovada (TIBURTIUS, ZAMORA; LEAL, op.cit.).

Tuburtius, Zamora e Leal (2004), fizeram menção aos efeitos danosos do benzeno, tolueno e xilenos ao organismo humano e de outros seres vivos. As doses tóxicas são de 10 a 90 ppm para o benzeno e 4 a 5 ppm para o naftaleno. Estes poluentes influenciam sistemas endócrinos e enzimáticos, além de que hidrocarbonetos ingeridos por organismos marinhos passam através da parede intestinal e se tornam parte da reserva lipídica. Quando dissolvidos no tecido adiposo, os hidrocarbonetos são preservados, porque estão protegidos do ataque microbiano, podendo ser transferidos da presa para o predador e, eventualmente, ao homem. A exposição prolongada a concentrações sub-letais de poluentes pode tornar o organismo mais susceptível às doenças. Aparecimento de tumores, alterações genéticas e leucemias são algumas conseqüências clínicas da intoxicação por hidrocarbonetos.

No Brasil, a portaria nº 518/2004 do Ministério da Saúde determina os valores máximos permitidos para benzeno, etil-benzeno, tolueno e xilenos (Tabela 5.1) em água de modo a respeitar o padrão de potabilidade para consumo humano, sem causar danos à saúde.

Tabela 5.1 - Padrão de potabilidade para consumo humano de acordo com a Portaria 518/2004 do Ministério da Saúde.

Parâmetro	Valor Máximo Permitido –VMP (mg/L)
Benzeno	0,005
Tolueno	0,2
Etil-benzeno	0,17
Xileno	0,3

Fonte: Brasil (2004)

6 METODOLOGIA GEOFÍSICA NA DETECÇÃO DE ÁREAS CONTAMINADAS POR HIDROCARBONETOS

Os métodos geofísicos são técnicas indiretas capazes de investigar estruturas de subsuperfície, essa investigação é, normalmente, feita a partir de medidas acima da superfície do terreno e portanto, são caracterizados como métodos não invasivos ou não destrutivos. As sondagens indiretas da geofísica têm sido utilizadas para identificar anomalias no subsolo, como forma de delinear preliminarmente o envoltório das contaminações, esboçando a provável dinâmica da pluma e permitindo racionalizar e orientar as prospecções diretas, amostragens e análises geoquímicas.

A metodologia geofísica permite avaliar as condições geológicas locais através dos contrastes das propriedades físicas dos materiais de subsuperfície tais como: condutividade ou resistividade elétrica, permissividade elétrica, magnetismo, densidade, entre outras, que podem ter como origem as diferenciações litológicas e outras heterogeneidades naturais ou não.

Uma das principais vantagens da aplicação das técnicas geofísicas é a rapidez na avaliação de grandes áreas com custo relativamente baixo. Além disso, os levantamentos geofísicos propiciam a execução de perfis contínuos, possibilitando a identificação com maior precisão das variações laterais decorrentes das mudanças litológicas ou originadas pela presença da contaminação subterrânea.

No diagnóstico ambiental de áreas contaminadas, a realização de levantamentos geofísicos tem por objetivo básico a identificação da presença da contaminação subterrânea, além da definição das feições geológicas e hidrogeológicas dos locais investigados.

As características do meio geológico, além da natureza da contaminação, podem determinar o comportamento dos contaminantes em subsuperfície. Nesse contexto, a interpretação dos dados geofísicos pode contribuir para a obtenção de informações sobre a litologia, estratigrafia, profundidade do nível d'água, existência de aquíferos importantes e os caminhos preferenciais de propagação subterrânea.

Em termos de contaminação em profundidade por derivados de hidrocarbonetos, como é o caso deste trabalho, o emprego da geofísica volta-se às valas contendo

resíduos, investigação da contaminação disseminada no solo e nas águas subterrâneas, detecção de tambores e tanques enterrados e determinação de vazamentos em tanques.

Existe uma variedade de métodos geofísicos que podem ser utilizados nos estudos ambientais, porém os principais e mais adequados métodos, que comumente são aplicados à investigação da contaminação do solo e da água subterrânea por hidrocarbonetos, são o Georadar (Ground Penetrating Radar – GPR), o Eletromagnético Indutivo de Baixa Freqüência (EM) e o método da Eletrorresistividade. Esses métodos respondem a contrastes nas propriedades elétricas do meio, uma vez que quando os combustíveis entram no meio, as propriedades elétricas da subsuperfície são modificadas. A resistividade elétrica, por exemplo, pode tanto aumentar como reduzir com a presença deste contaminante. Por serem altamente resistivos, ao chegar em ambiente, causam um aumento imediato da resistividade e conseqüentemente diminuição da condutividade. Porém, com o passar do tempo, a ação de bactérias produz a bio-degradação dos combustíveis com a formação de ácidos que tornam o ambiente menos resistivo (mais condutivo), invertendo a característica inicial (SAUCK, 1998).

A realização dos levantamentos geofísicos pode ser efetuada nas diferentes etapas de atividades estabelecidas para o gerenciamento de áreas contaminadas:

- Na etapa de investigação confirmatória, as técnicas geofísicas são utilizadas para localizar os pontos de amostragem mais adequados, através da determinação de anomalias que representam os locais com maiores concentrações de contaminantes (*hot spots*);
- Quando da investigação detalhada e investigação para remediação, os métodos geofísicos podem ser empregados para o mapeamento e monitoramento da propagação da contaminação;
- Na fase de remediação de áreas contaminadas, estes métodos podem ser aplicados na avaliação da eficiência dos trabalhos de recuperação pela confirmação das reduções das concentrações dos contaminantes.

6.1 GEORADAR (*GROUND PENETRATING RADAR* – GPR)

O Radar de Penetração de Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) é uma metodologia geofísica relativamente nova na investigação ambiental. O georadar pode caracterizar as propriedades das rochas e estruturas a pequenas profundidades, com grande resolução e vem sendo usado principalmente para localizar objetos enterrados ou interfaces geológicas em subsuperfície. O georadar (GPR), também tem sido bastante utilizado na investigação de áreas sujeitas à contaminação por hidrocarbonetos e outros contaminantes.

O método GPR é atualmente o método geofísico de mais alta resolução, ele é fundamentado na propagação e reflexão de ondas eletromagnéticas, mais precisamente ondas de rádio, que operam na faixa de frequências de 1 a 1500 MHz.

Como em outras técnicas geofísicas, este método depende do sinal de retorno que é resultado da interação entre o sinal emitido e as propriedades eletromagnéticas dos materiais em subsuperfície.

As propriedades eletromagnéticas de materiais geológicos são controladas principalmente pelo seu conteúdo de água (TOPP; DAVIS; ANNAN, 1980). As águas subterrâneas presentes na natureza, normalmente, apresentam condutividade elétrica apreciável, pois sempre têm algum sal dissolvido. Essas águas, também, apresentam elevada constante dielétrica (TOPP; DAVIS; ANNAN, op.cit.). Por outro lado a condutividade elétrica e a constante dielétrica dos hidrocarbonetos são baixas em relação às da água subterrânea.

Nas frequências entre 100 a 1000 MHz, a permissividade relativa (constante dielétrica) dos hidrocarbonetos varia de 2 a 30, sendo bastante inferior à água que é de 80. Por outro lado, a condutividade elétrica de hidrocarbonetos varia desde próximo de zero até 20 mS/m (PEDROSA, 2004).

A condutividade elétrica dos materiais do solo ou rocha provoca significantes perdas de propagação do sinal GPR conforme seu valor aumenta. Isso ocorre devido à absorção de energia (atenuação), o que limita a profundidade de penetração do radar.

6.1.1 Princípios Básicos do GPR

A aquisição de dados com GPR, parte da radiação de ondas eletromagnéticas (EM) geradas por uma antena transmissora na superfície do terreno, as quais se propagam na subsuperfície, sofrendo reflexão, refração e difração. As ondas refletidas que retornam à superfície, podem ser detectadas na mesma antena transmissora (princípio mono-estático) ou numa antena receptora independente (princípio biestático).

O princípio físico e a metodologia de aquisição de dados GPR é semelhante a técnica de reflexão sísmica, e permite estimar as profundidades das interfaces de reflexão desde que se conheça a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas. As interfaces de reflexão são definidas graças às variações nas propriedades eletromagnéticas do subsolo (resistividade, constante dielétrica e permeabilidade magnética), as quais, por sua vez, causam reflexões e atenuações do sinal transmitido a partir do GPR. O sinal refletido é detectado pelo receptor onde é amplificado, digitalizado e registrado por meio digital para o pré-processamento e visualização dos dados, como mostra, de maneira esquemática, Figura 6.1 (DAVIS; ANNAN, 1989).

A transferência de energia eletromagnética para subsuperfície pode ocorrer através dos processos de difusão ou propagação de uma onda eletromagnética.

O processo de difusão do campo eletromagnético ocorre quando se usam as baixas frequências (< 1 MHz) utilizadas na maioria dos métodos eletromagnéticos. Neste caso, se consideram somente as correntes de condução, desprezando-se as correntes de deslocamento.

O processo de propagação da onda eletromagnética ocorre a altas frequências (1-1000 MHz). Nesse processo são consideradas as correntes de deslocamento e as correntes de condução.

No método Georadar, devido às frequências serem elevadas, a transferência é feita predominantemente pelo processo de propagação de onda.

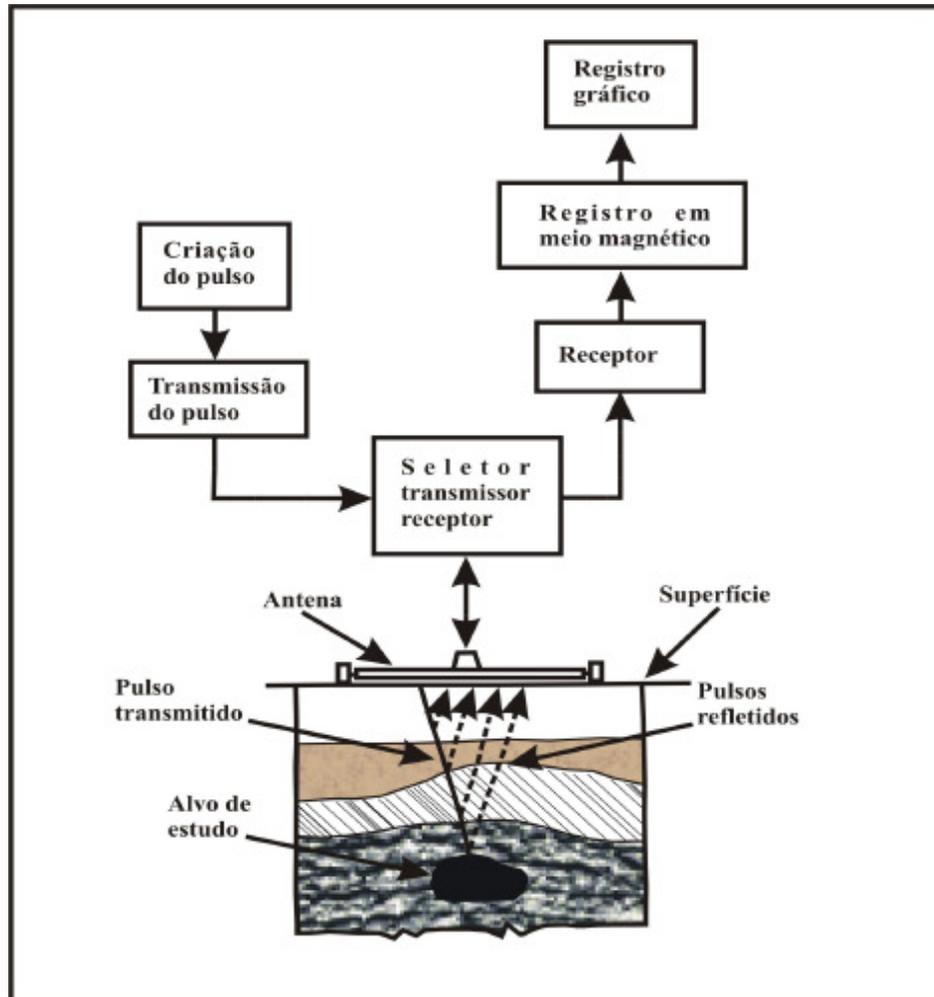


Figura 6.1 - Bloco diagrama simplificado de um sistema GPR simples.
 Fonte: Modificado de (DAVIS; ANNAN, 1989)

Segundo os princípios de Maxwell a equação de onda para o campo elétrico é dada por:

$$\nabla^2 \vec{E} = i\omega\mu\sigma \vec{E} - \omega^2 \mu\epsilon \vec{E}, \quad (1)$$

em que ∇^2 é o operador matemático com segunda derivada, \vec{E} é o campo elétrico, $i = \sqrt{-1}$, ω é a frequência angular ($2\pi f$) (rad/s), μ é a permeabilidade magnética (H/m), σ é a condutividade elétrica (S/m) e ϵ é a permissividade ($C^2/N.m^2$).

A solução geral para a equação de onda (1), no caso harmônico, é dada por:

$$E = E_0 e^{-\alpha z} e^{i(\omega t - \beta z)}, \quad (2)$$

sendo que E_0 representa a intensidade do campo elétrico inicial, z é a profundidade e, α (constante de atenuação da onda) e β (constante de propagação de fase) são parâmetros que incluem as propriedades eletromagnéticas do meio. Segundo Luiz (1998), a primeira exponencial da equação (2) controla a atenuação, e a segunda controla a propagação.

Os fatores que caracterizam a propagação de uma onda num determinado meio são a velocidade e a atenuação da onda nesse meio.

A velocidade das ondas eletromagnéticas depende da constante dielétrica ou permissividade elétrica relativa (K), da permeabilidade magnética relativa ($\mu_r=1$, para materiais não magnéticos) e do fator de perda P . Assim, a velocidade de propagação de uma onda eletromagnética num dado material (V) é dada por:

$$V = \frac{c}{\left\{ \frac{K\mu_r}{2} \left[(1 + P^2)^{1/2} + 1 \right] \right\}^{1/2}}, \quad (3)$$

sendo P , o fator de perda (*loss factor*), dado por:

$$P = \sigma / \omega \epsilon \quad (4)$$

e:

$$K = \frac{\epsilon}{\epsilon_0},$$

sendo c a velocidade da luz no vácuo (0,3 m/ns e ϵ_0 a permissividade do vácuo (8,84x10¹² F/m).

Quando se empregam as altas frequências do GPR $\omega^2 \epsilon^2 \gg \sigma^2$, de modo que nos meios não magnéticos ($\mu_r = 1$) a equação (3) pode ser simplificada para:

$$V = \frac{c}{\sqrt{K}}. \quad (5)$$

A expressão (5) é a mais empregada na estimativa da velocidade da onda do GPR.

Verifica-se a partir de S) que a permissividade exerce grande influência na velocidade de propagação da onda, pois à medida que o valor da permissividade aumenta, a velocidade diminui.

A frequência e a resistividade elétrica do meio são fatores que influenciam diretamente na profundidade de penetração que onda irá alcançar. Resistividades baixas e frequências mais altas contribuem para uma maior absorção de energia da onda e, assim, a profundidade de penetração será menor. Por outro lado, frequências elevadas contribuem para que haja maior resolução do material investigado e permitem identificar alvos bem pequenos, já que para uma determinada velocidade, à medida que a frequência aumenta o comprimento de onda diminui, conforme a relação:

$$V = \lambda f, \quad (6)$$

em que λ é o comprimento de onda e f é a frequência da onda.

Outro fator importante, a atenuação da onda, é dado pela expressão, (REYNOLDS, 1997):

$$\alpha = \omega \sqrt{\left(\frac{\mu \epsilon}{2}\right) \left(\sqrt{1 + \frac{\sigma^2}{\omega^2 \epsilon^2}} - 1\right)}. \quad (7)$$

A permeabilidade exerce, portanto, influência tanto na atenuação, quanto na velocidade. Assim quanto maior for o seu valor, maior será a atenuação e menor será a velocidade. Na prática essa influência é mínima, salvo em situações onde haja grandes concentrações de magnetita na subsuperfície (LUIZ, 1998).

Na equação (7) observa-se a relação entre a condutividade do terreno e a atenuação. Como esses dois parâmetros são diretamente proporcionais, a atenuação será maior quanto mais alta for a condutividade. Portanto, áreas muito condutivas,

como camadas argilosas, podem facilmente impedir a penetração das ondas. Como o sucesso do uso do GPR baseia-se na variabilidade do solo ao permitir a transmissão de ondas eletromagnéticas, na prática observa-se que o método produz respostas satisfatórias em ambientes geológicos com resistividade maior ou igual a 500 Ω .m, condutividade menor igual a 2×10^{-3} S/m (LUIZ, 1998).

A proporção de energia refletida é determinada pelo contraste na velocidade da onda e.m.:

$$R = \frac{v_1 - v_2}{v_1 + v_2}, \quad (8)$$

em que R é o coeficiente de reflexão da interface que separa os meios 1 e 2. Substituindo a expressão (5) em (8), tem-se:

$$R = \frac{\sqrt{K_2} - \sqrt{K_1}}{\sqrt{K_2} + \sqrt{K_1}}. \quad (9)$$

em que K_1 e K_2 representam as constantes dielétricas das camadas do meio superior e inferior respectivamente, assim como v_1 e v_2 são as respectivas velocidades de propagação do pulso nas mesmas. A magnitude de R varia de ± 1 .

Na equação (9) observamos a relação entre o coeficiente de reflexão e a constante dielétrica dos meios em que a onda interage. Essa relação mostra que quanto maior for o contraste entre as constantes dielétricas relativas das camadas, maior será a quantidade de energia refletida.

A resposta do GPR é extremamente sensível ao conteúdo de água no meio. Assim, materiais tais como argilas saturadas de água e a água salgada que são muito condutivos, absorvem as ondas e tornam invisíveis as camadas sotopostas.

A Tabela 6.1 apresenta os valores de constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação do sinal para os materiais geológicos mais comuns, todos observados a uma frequência de 100 MHz.

Tabela 6.1 - Constante dielétrica (K), condutividade elétrica (σ), velocidade (v) e atenuação (α) típicas de alguns materiais.

Material	K	σ (mS/m)	v (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água fresca	80-81	0,5	0,033	0,1
Água do mar	80	3×10^4	0,01	10^3
Areia seca	3-5	0,01	0,15	0,01
Areia saturada	20-30	0,1-1	0,06	0,03-0,3
Calcário	4-8	0,5-2	0,12	0,4-1
Argila	5-40	2-1000	0,06	1-300
Granito	4-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Sal seco	5-6	0,01-1	0,13	0,01-1
Gelo	3-4	0,01	0,16	0,01
Concreto	4-10		0.095-0.150	
Metal	300	10^{10}	0.017	
Gasolina	1.94	10^{-7}	0,22	
Benzeno	2.28	10^{-7}	0,2	
Metanol	32.6	34	0.052	
DNAPL	2.3	10^{-7}	0,19	

Fonte: Davis e Annan (1989).

O outro fator significativo sobre a influência da água na penetração do sinal de radar no subsolo é o fenômeno de relaxação molecular da água, que ocorre próximo à frequência de 10 GHz, mas cujo efeito se faz notar a frequências menores (Figura 6.2). Esse fenômeno governa a diminuição da penetração do sinal em função da frequência, e limita a faixa de frequência de operação do radar até cerca de 1 GHz.

6.1.2 Modos de Aquisição de Dados

Um equipamento de GPR é constituído por um gerador de sinal, uma antena (modo mono-estático) que realiza as funções de emissão e recepção ou um par de antenas (modo bi-estático), com estas funções exercidas separadamente. Nesta última configuração pode-se fazer variar a distância entre as duas antenas, permitindo assim medições de reflexão de grande ângulo e mesmo refração. O sinal obtido, denominado de *scan* pode ser visualizado e gravado em sistemas próprios, sendo o mais comum o

acoplado a um microcomputador. Desta forma, é possível obter uma imagem dos scans (denominada radargrama) ainda no campo e ter controle dos dados adquiridos.

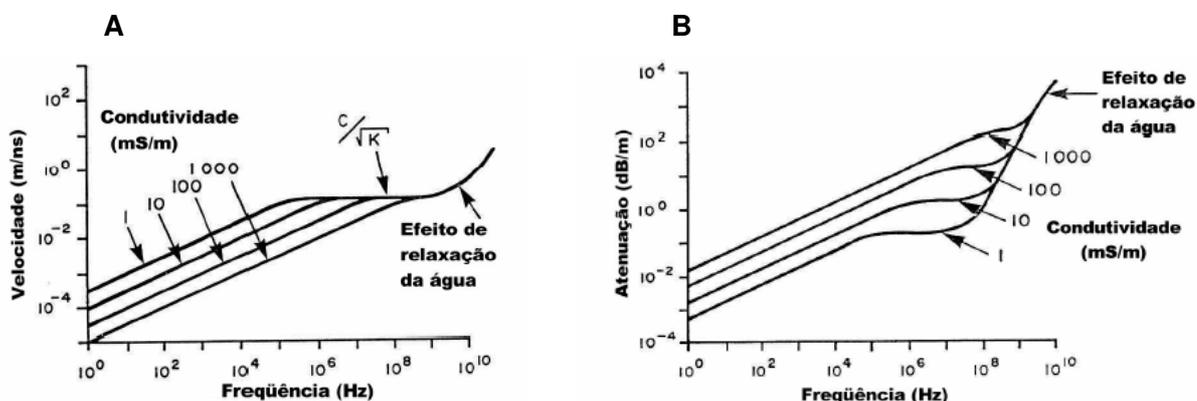


Figura 6.2 – (A) Relação entre velocidade e freqüência a diferentes condutividades, e (B) relação entre atenuação e freqüência a diferentes condutividades.

Fonte: Adaptada de Davis e Anan (1989).

A operação de medidas com os sistemas de radar podem ser subdivididos em três modos básicos de aquisição: 1) perfis de reflexão com afastamento constante (Figura 6.3 A), quando se utiliza uma antena mono-estática ou um par de antenas bi-estáticas separadas por uma distancia fixa (*offset comum*); 2) sondagens de velocidade que incluem a técnica WARR (*wide angle reflection and refraction*) onde uma antena é mantida fixa enquanto a outra é deslocada (Figura 6.3 B), e a técnica CMP (*Common Mid Point*), onde as duas antenas são deslocadas para ambos os lados de um ponto central (Figura 6.3 C); e 3) os modos de transiluminação, ou tomografia, que consiste em colocar as antenas transmissora e receptora em poços lateralmente adjacentes.

6.1.3 Processamento dos dados

O processamento de dados do GPR é um assunto bastante extenso, uma vez que as técnicas de processamento e os *softwares* utilizados na sísmica encontram-se disponíveis para as aplicações do GPR. Assim, pode-se dizer que a linguagem técnica, as técnicas de aquisição e processamento de dados foram herdadas da sísmica.

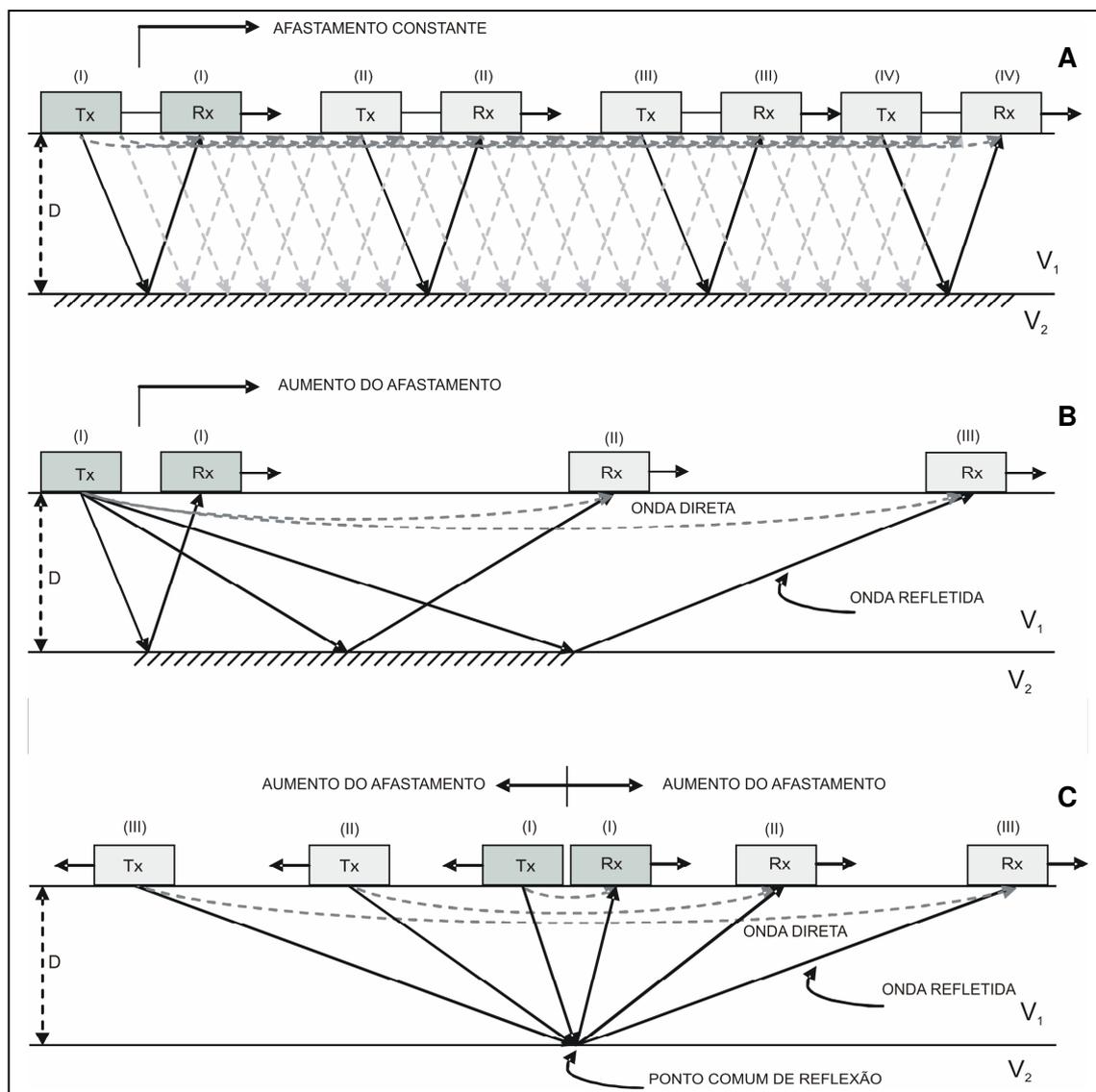


Figura 6.3 – Os três modos de operação GPR: (A) *off-set comum*, (B) *WARR*, e (C) *CMP*.

Fonte: Modificada de Reynolds (1997).

O processamento de sinais é o conjunto de operações que é aplicado aos dados, para adequá-los a um determinado propósito. Tanto no caso dos dados de reflexão sísmica como de GPR, o objetivo do processamento é produzir uma imagem nítida das camadas em subsuperfície, a partir do sinal transmitido, devolvido e registrado na superfície (DUARTE, 1997).

Segundo Yilmaz (1987), as estratégias e resultados de processamento de dados são fortemente afetados pelos parâmetros de aquisição de campo. Geralmente, as condições de campo estão abaixo do ideal. Condições de superfície de ordem ambiental ou demográfica, condições do tempo, cuidados tomados durante o registro e condições do equipamento influenciam a qualidade de dados. Para o autor, o papel do processamento então é eliminar o ruído e melhorar o sinal para aproveitá-lo o máximo permitido pela qualidade de aquisição dos dados.

Alguns dos procedimentos aplicados no processamento são:

- ***Pré-Processamento***

É feita uma análise visual da seção e a partir disso é realizada a edição do radargrama, recortando-o, eliminando ou deslocando *scans* quando necessário. Nessa etapa, algumas vezes é necessário reamostrar o radargrama a fim de estabelecer a escala horizontal.

- ***Ganho de tempo (Ampliação do Sinal)***

O sinal de radar ao se propagar no solo decai exponencialmente, assim, as reflexões associadas a estruturas profundas são difíceis de serem identificadas. Para compensar os efeitos da atenuação e melhorar a visualização destas estruturas, usam-se as funções de ganho, que também podem ser usadas após a filtragem, já que durante esta etapa podem ocorrer perdas na amplitude dos sinais.

- ***Filtros Digitais***

Os filtros digitais permitem eliminar os ruídos adquiridos na coleta de dados do GPR. São divididos em duas categorias: a) os filtros verticais utilizados para remover informações indesejadas; e b) os filtros horizontais usados para atenuar ruídos provocados pelo deslocamento horizontal das antenas. Os filtros verticais estão divididos em Passa Alta Vertical (*Vertical High Pass Filter*) e Passa Baixa Vertical

(*Vertical Low Pass Filter*). O primeiro é usado para eliminar ruídos de baixa frequência e o segundo para eliminar todos os ruídos de alta frequência dos dados coletados pelo GPR. Os filtros horizontais se dividem em Passa Alta Horizontal (*Horizontal High Pass Filter*) usado para remover bandas de ruídos de baixa frequência, que podem mascarar as reflexões reais em profundidade e Passa Baixa Horizontal (*Horizontal Low Pass Filter*), que é utilizado para remover ruídos de alta frequência, que interferem na continuidade horizontal das reflexões.

- ***Migração***

Com a seção de radar espera-se obter a representação das estruturas presentes no subsolo. Entretanto, alvos pontuais produzem difração que são registrados como hipérboles, enquanto estruturas planares, com mergulho considerável, são deslocadas de suas posições verdadeiras, apresentando semi-hipérboles em suas extremidades. Descontinuidades bastante inclinadas e falhas podem também causar reflexões de energia difratadas do radar. Estas energias difratadas podem mascarar outras reflexões de interesse e causar interpretação errada de tamanho e geometria da superfície do objeto. Para corrigir essa geometria aparente das camadas e acabar com as difrações hiperbólicas utiliza-se a migração que irá mover os refletores inclinados para a posição correta e colapsar as hipérboles.

7 O MUNICÍPIO DE ABAETETUBA

O município de Abaetetuba, em cuja região urbana foi realizado este trabalho, pertence à Mesorregião Nordeste do Estado do Pará, fazendo parte da Microrregião de Cametá (Figura 7.1).

O principal meio de acesso ao município é o rodoviário, utilizando a Alça Viária e a rodovia PA – 150. O acesso pode ser também fluvial, através da Baía do Guajará, do rio Pará e da baía do Capim.

Abaetetuba limita-se ao norte com o rio Pará e município de Barcarena; ao sul com os municípios de Igarapé-Miri e Moju; a leste com os municípios de Moju e Barcarena e a oeste com o rio Pará e município de Igarapé-Miri.

De acordo com os dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística IBGE (1996), o município possui uma área de 1521,45 km² composta do distrito de Abaetetuba, que pode ser dividido em área urbana e rural, e distrito de Beja que é um balneário local.

Sua população está estimada em 106.738 habitantes, atingindo uma densidade demográfica de 70,17 (hab/ km²), com 54.362 homens e 52.376 mulheres.

A área de estudo está localizada na região central da sede do município, onde estão localizados os postos de serviços. Essa área situa-se a sudoeste da cidade de Belém, perfazendo cerca de 80 Km da mesma.

A área urbana de Abaetetuba é composta por 14 bairros (Figura 7.2) e foi escolhida para o estudo da contaminação por derivados de petróleo provenientes de postos de serviços, por ser um lugar de fácil acesso, relativamente próximo a capital e que não apresenta grandes dificuldades logísticas e de aplicação da metodologia GPR.

7.1 CARACTERÍSTICAS GEOAMBIENTAIS DE ABAETETUBA

As características geoambientais de Abaetetuba são fatores importantes no que concerne o estudo de contaminação do solo e da água por hidrocarbonetos.

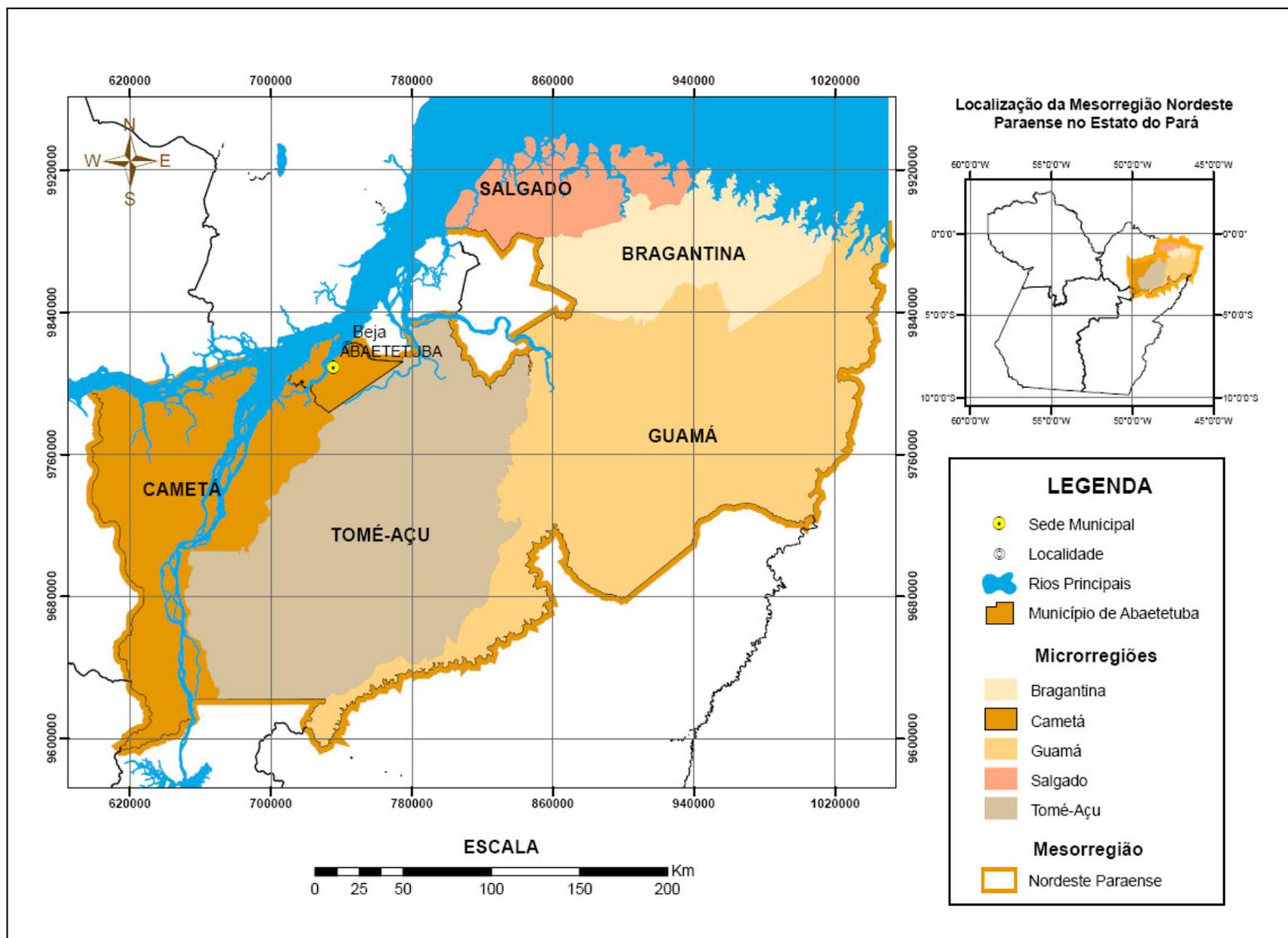


Figura 7.1 – Município de Abaetetuba inserido na Mesorregião Nordeste do Estado do Pará e Microrregião de Cametá.

Dentre os aspectos geoambientais destacam-se o clima, a fisiografia e a geologia. Para a área de Abaetetuba esses fatores apresentaram diversas características que se encontram descritas a seguir.

7.1.1 Clima

Abaetetuba encontra-se delimitada pelos rios Capim, Pará e Carnapijó, possuindo altitudes variando desde níveis que estão abaixo do nível médio do mar até os 30m em alguns poucos locais, predominando altitudes menores que 10m. Tudo isso influencia no clima da região que é quente e insere-se na categoria super úmido, que corresponde ao tipo Am na classificação de Köppen.

O município de Abaetetuba, bem como grande parte da região Amazônica, apresenta altas temperaturas e precipitações abundantes, o que propicia um solo argiloso úmido e lixiviador, portanto menos condutivo que o normal. A temperatura média é de 27°C.

7.1.2 Fisiografia

Os aspectos fisiográficos correspondem aos elementos físicos do ambiente entre eles estão o solo, o relevo, a vegetação e a hidrografia.

7.1.2.1 Solo

Segundo Silva (2002), a origem e evolução dos solos sofrem a influência de cinco fatores principais:

- Clima, condicionando principalmente a ação da água da chuva e da temperatura;
- Materiais de origem, condicionando a circulação interna da água e a composição e conteúdo mineral;

- Organismos, vegetais e animais, interferindo no microclima, formando elementos orgânicos e minerais, e modificando as características físicas e químicas;
- Relevo, interferindo na dinâmica da água, no microclima e nos processos de erosão e sedimentação. Pode-se dizer que, em geral, os aspectos climáticos mais importantes no desenvolvimento pedogenético são representados pela temperatura e precipitação pluviométrica;
- Tempo, transcorrido sob ação dos demais fatores.

Assim, o município de Abaetetuba tem os seus solos influenciados pelo fator climático da região que é responsável por chuvas constantes e por altas temperaturas, fatores já mencionados anteriormente nos aspectos climáticos e que são grandes responsáveis por alterações nos solos.

Somando-se ao fator ambiental estão as modificações de ordem antrópica, que são responsáveis pela degradação substancial dos solos, isso pode ocorrer através da expansão urbana muitas vezes desordenada, fator que é observado na região estudada.

Entretanto, apesar de todos os fatores mencionados os solos de Abaetetuba podem ser reconhecidos e representados pelo predomínio do Latossolo Amarelo Distrófico textura média associado ao Podzol Hidromórfico e Solos Concrecionários Lateríticos Indiscriminados distróficos, textura indiscriminada e relevo plano (PARÁ, 2003).

Em “manchas” nas ilhas, estão os solos Gleys Eutróficos e Distróficos, e Aluviais Eutróficos e Distróficos de textura indiscriminada.

A seguir será feita a descrição dos principais tipos de solo ocorrentes na área de acordo com o Pará (op.cit.).

- *Latossolo Amarelo Distrófico*

É um solo muito espesso, de textura média a muito argilosa, com alta capacidade de troca iônica, um baixo conteúdo de carbono orgânico, alta saturação em alumínio,

baixo conteúdo de fósforo assimilável e alto conteúdo de fósforo total. Esse tipo de solo é resultante da Formação Barreiras, formando um relevo plano sob floresta densa.

- *Podzol Hidromófico*

É constituído por sedimentos arenosos, pertencentes ao quaternário, encontra-se bem drenado e com ausência de materiais primários de decomposição.

- *Concrecionário Laterítico*

É um solo constituído por sedimentos argilosos ou areno-argilosos, com presença de concreções ferruginosas, moderadamente espesso, formado em superfícies planas ou suavemente onduladas e em solo de floresta densa.

Nas ilhas estão presentes os solos hidromórficos indiscriminados, eutróficos e distróficos; hidromórficos gleisados, como o gley pouco húmico e aluvial eutróficos e distróficos.

- *Laterita Hidromórfica*

É um solo desgastado e ácido rico em sesquióxidos e pobre em húmus. A profundidade varia de 17 a 52 cm. A coloração é vermelha, cinza ou branca ocasionada pela presença de um material mosqueado e outro argiloso intemperizado.

- *Aluvial Eutrófico*

Nas ilhas ocorre, ainda o solo tipo aluvial eutrófico que engloba áreas de formação recente. Apresenta propriedades morfotexturais variadas, que vão da areia até a argila, e profundidades de 0,8 a 2,0 metros.

7.1.2.2 Relevô

Abaetetuba localiza-se na região morfológica dos “baixos platôs amazônicos e planícies litorâneas”. Tem seu sítio constituído por plataforma cumiada que corresponde ao nível local mais elevado do planalto terciário. Os níveis destas plataformas situam-se entre 15 a 30 metros e são terrenos escalonados cujas amplitudes variam entre 4 e 15 metros. Existem, ainda, baixadas inundáveis, formadas por áreas situadas abaixo da cota de 4 metros (ALMEIDA, 2005).

7.1.2.3 Vegetação

Praticamente não existe a primitiva cobertura vegetal da floresta hileiana de grande porte (floresta densa de terra firme), que recobria, indistintamente, a maior parte do Município. O que existe atualmente no local dessa floresta é a floresta secundária intercalada com cultivos agrícolas (PARÁ, 2003).

7.1.2.4 Hidrografia

Abaetetuba possui uma rede hidrográfica bastante vasta, navegável em vários de seus trechos. O principal rio da área é o Tocantins, nesse rio se destacam dezenas de ilhas. O rio Abaeté banha a sede do município e deságua na baía do Capim. Outros rios que deságuam na baía do Capim são: Guajará de Beja, Arapiranga de Beja e Arienga, este último fazendo limite a Nordeste com o município de Barcarena.

O rio Tocantins recebe águas do rio Maratauíra. Esse último separa a zona de terra firme, situada a leste do município, da zona das ilhas, situada a oeste e recebe as águas de vários rios.

Características da Rede de Drenagem

No município de Abaetetuba observa-se uma drenagem com densidade alta, sinuosidade mista, angulosidade média, assimetria forte, apresentando como formas anômalas mais comuns: cotovelo e arco (Figura 7.2).

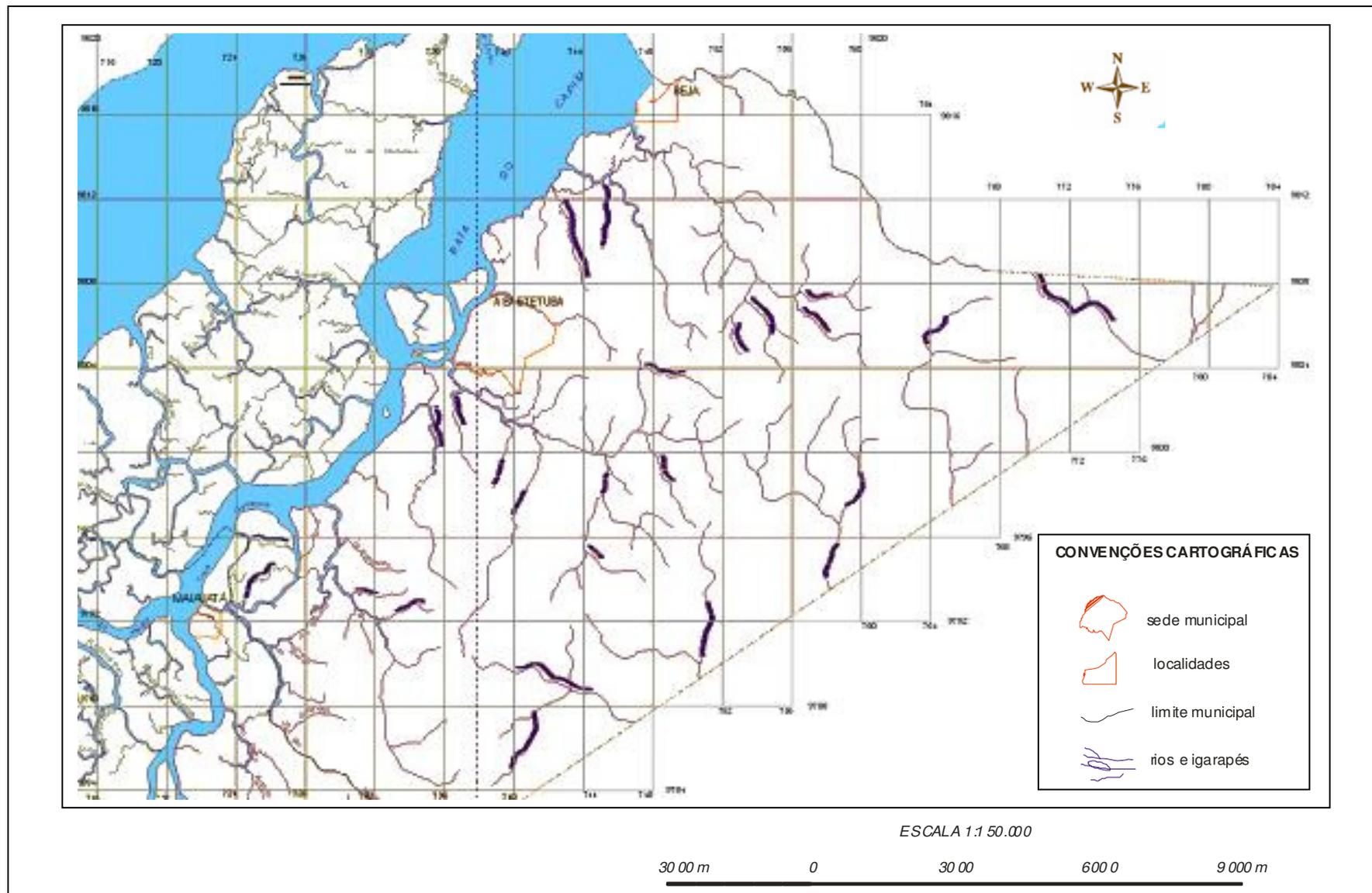


Figura 7.2- Mapa da Rede de Drenagem da região de Barcarena-Abaetetuba/PA.

Fonte: Pará (1999).

7.1.3 Contexto Geológico

Os condicionantes litológicos são fatores determinantes na caracterização de uma determinada área, quer seja para estudos de cunho geológico, hidrogeológico ou geofísico. Apresenta-se, aqui, uma descrição resumida dos principais termos estratigráficos ocorrentes na região nordeste do estado do Pará e suas características litológicas, no sentido de embasar esta pesquisa (Tabela 7.1).

Estudos bibliográficos realizados na área mostraram que o conjunto litoestratigráfico que compõe essa região é formado pela Formação Pirabas, Formação Barreiras, Formação Pós-Barreiras e pelos Sedimentos Recentes.

- *Formação Pirabas*

É a unidade estratigráfica mais antiga relacionada com a área estudada. Esta unidade, porém, não aflora dentro do contexto da área de estudo. As ocorrências dessa formação estão principalmente na Ilha de Fortaleza, município de Primavera (PA), mas ocorrem também ao longo da faixa da costa do estado do Pará, nas localidades de Salinópolis, Maracanã, São João de Pirabas, Curuçá e arredores da cidade de Capanema.

A litologia da Formação Pirabas é caracterizada por leitos de calcário, ricamente fossilíferos, de coloração amarelada ou acinzentada, alternados com argilas e areias. Às vezes são calcários duros de coloração cinza, intercalados com camadas de argila calcífera em leitos sucessivos, esta sucessão forma a base da Formação Pirabas.

A parte superior é formada por calcário, compacto, disposto em camadas horizontais, sendo muito fossilífero (SAUMA FILHO, 1996).

- *Formação Barreiras*

A ocorrência dessa Formação é registrada em grande parte do estado do Pará, observa-se essa formação na região do Salgado, região Bragantina e nas adjacências da Região Metropolitana de Belém (RMB), além das ilhas de Mosqueiro e Outeiro.

Tabela 7.1 - Coluna Estratigráfica Regional.

ERA	<i>PERIODO</i>	<i>ÉPOCA</i>	<i>UNIDADE</i>	DESCRIÇÃO SUMÁRIA
Cenozóico	Quaternário	Holoceno	Sedimentos Modernos	Areias de granulometria fina a média, marrons, intercaladas a argilas escuras, com restos vegetais, distribuídos nas orlas dos rios e igarapés.
		Pleistoceno	<i>Pós-Barreiras</i>	Sedimentos inconsolidados, areno-argilosos, finos a médios, com concreções ferruginosas.
	Terciário	Mioceno-Plioceno	<i>Grupo Barreiras</i>	Arenitos ferruginosos, areias finas a médias, siltosas e argilosas.
		Oligo-Mioceno	<i>Formação Pirabas</i>	Calcários fossilíferos e margas, intercalados com folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos.

De acordo com o mapa geológico, observa-se que em Abaetetuba essa formação é predominante (Figura 7.3).

A área estudada apresenta um sistema intercalado de areias e argilas com aspectos geométricos bastante complexos e também, conglomerados com cores variadas, às vezes até lateritizados, sob a forma de um perfil imaturo (SAUMA FILHO, 1996).

- *Formação Pós-Barreiras*

Na região estudada observa-se a ocorrência da Formação Pós Barreiras nas áreas de várzeas, ilhas e margens de igarapés e rios (Figura 7.3).

Os sedimentos dessa formação são areno-argilosos, de granulometria grossa, amarelados e inconsolidados. Estão em discordância erosiva sobre a Formação Barreiras, em um contato marcado por seixos rolados de arenito ferruginoso ou ainda fragmentos dos sedimentos Barreiras (SAUMA FILHO, op.cit.).

- *Sedimentos Modernos*

São observados às margens de igarapés, melhor à maré baixa e nas praias da região, no caso de Abaetetuba observa-se essa Formação somente nas proximidades da praia de Beja (Figura 7.3).

São representados por clásticos do tipo areia, silte e argila. Também compõem a unidade os solos ricos em húmus, de coloração escura a amarronzada (SAUMA FILHO, op.cit.).

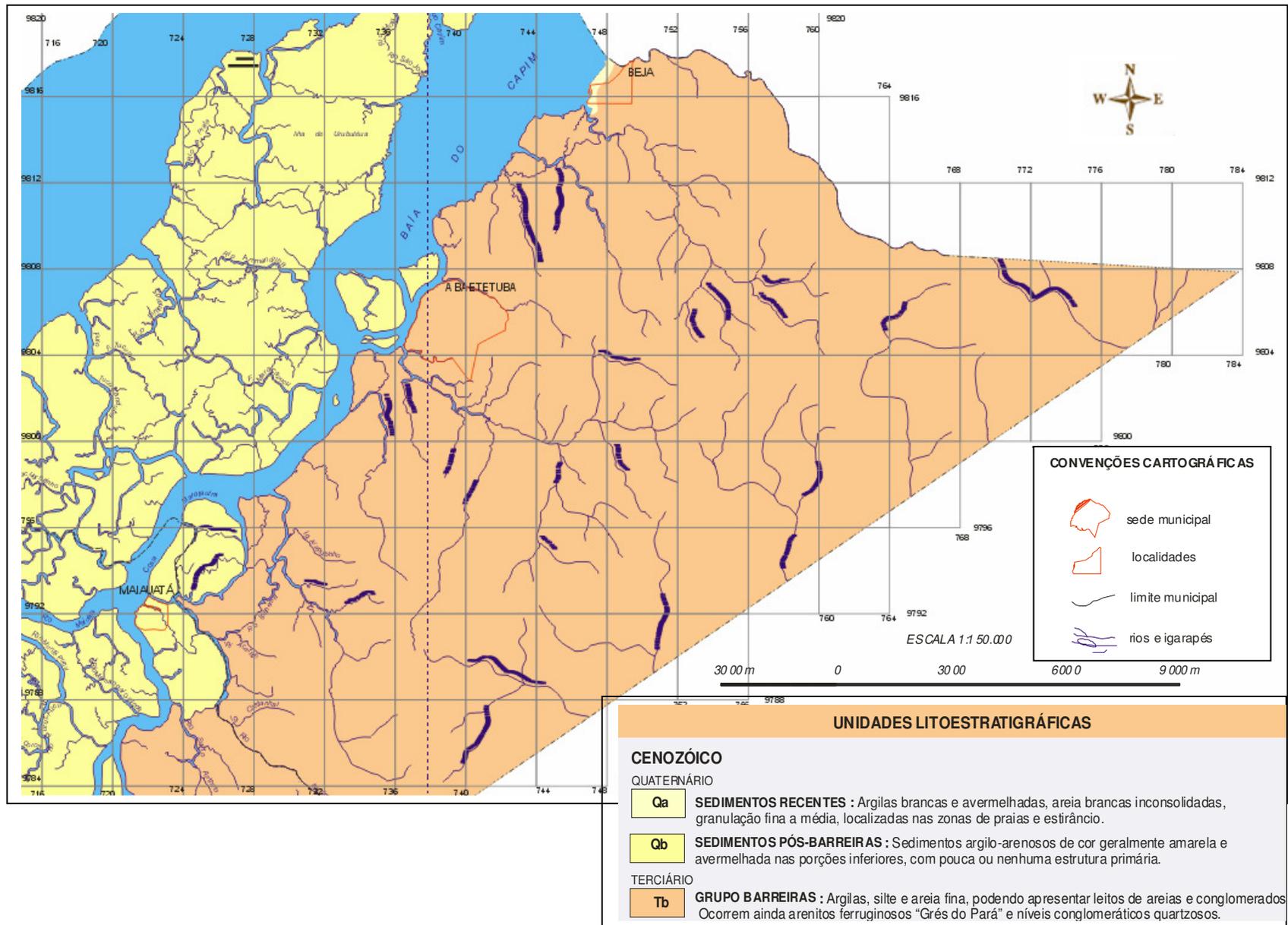


Figura 7.3 – Mapa Geológico de Abaetetuba/PA.
Fonte: Pará (1999).

8 HIDROGEOLOGIA DA ÁREA

As características hidrogeológicas de uma determinada região é de fundamental importância no estudo da contaminação subterrânea por hidrocarbonetos produzida à partir de postos de serviços, pois este tipo de estudo propicia o conhecimento da distribuição do fluxo subterrâneo e do grau de vulnerabilidade à contaminação das camadas aquíferas da região.

Nesta dissertação essas informações foram adquiridas através da construção de um banco de dados hidrogeológicos para área urbana de Abaetetuba. A partir do banco desse banco de dados, observaram-se diversos aspectos que encontram-se descritos ao longo deste capítulo.

8.1 BANCO DE DADOS HIDROGEOLÓGICOS

A fim de construir um panorama geral caracterizando a hidrogeologia da área, foi criado um banco de dados hidrogeológicos, constituído a partir de um mapa urbano da cidade, passando por uma coleta de dados hidrogeológicos (bibliografia), até dados adquiridos no âmbito da área através de visitas técnicas de campo.

A partir das visitas técnicas de campo, foi criado um arquivo de dados onde um total de 42 (quarenta e dois) poços foram cadastrados e analisados em termos de localização geográfica, nível estático e dados altimétricos (Figuras 8.1, 8.2 e Tabela 8.1). Estes poços encontram-se distribuídos nos bairros Centro, Santa Rosa, Aviação e arredores onde estão concentrados os postos de serviços da região (Figura 8.3).

8.2 SISTEMAS HIDROGEOLÓGICOS

Para definir os sistemas hidrogeológicos ocorrentes na área utilizou-se a classificação de Matta (2002) formulada para a região de Belém e Ananindeua. Isso foi possível devido a proximidade e semelhança das áreas.



Figura 8.1- Cadastramento de poços em Abaetetuba/PA.



Figura 8.2 – Medida de nível estático em Abaetetuba/PA.

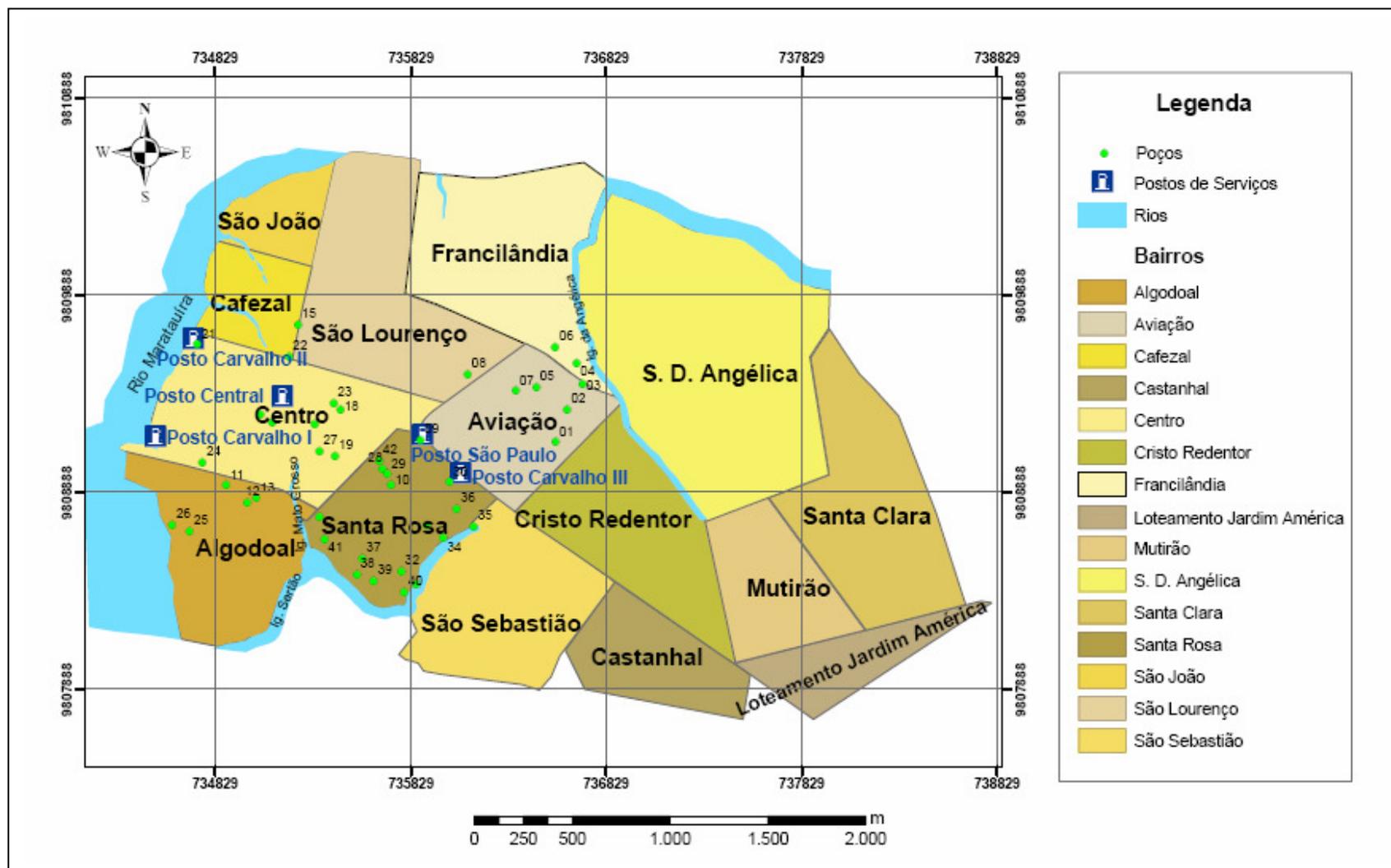


Figura 8.3 - Mapa de localização dos poços cadastrados na sede de Abaetetuba/PA.

Tabela 8.1 – Principais características dos poços cadastrados na área.

Poços	Endereço	Bairro	Coordenadas UTM E	Coordenadas UTM N	Nível Est. (m)
01	Av. Brigadeiro	Aviação	736570	9809139	3,85
02	Av. Brigadeiro	Aviação	736631	9809307	3,5
03	Av. Brigadeiro	Aviação	736708	9809437	3,1
04	Trav. Tabajara	Aviação	736678	9809545	2,9
05	Rua Nova IV, 64	Aviação	736471	9809421	3,55
06	Rua Ubiratan Dias	Aviação	736569	9809621	3,1
07	Rua Nova III, 2086	Aviação	736366	9809399	3,5
08	Av. São Paulo	Aviação	736121	9809483	3,5
09	Posto São Paulo	Aviação	735880	9809153	2,4
10	Hospital Santa Rosa	Sta Rosa	735730	9808923	8
11	Rua Veiga Cabral	Algodoal	734885	9808919	3,5
12	Trav. Tiradentes	Algodoal	734994	9808833	2
13	Rua Lauro Sodré	Centro	735039	9808855	1,8
14	Rua Lauro Sodré, (próx. Posto Central)	Centro	735120	9809237	3
15	Rua Lauro Sodré	Centro	735252	9809739	1,7
16	Rua D. Pedro II	Centro	735059	9809277	3
17	Rua D. Pedro II	Centro	735339	9809233	3
18	Rua 1ª de Maio	Centro	735470	9809305	3,5
19	Rua 1ª de Maio	Centro	735441	9809071	2,5
20	Rua 1ª de Maio	Centro	735364	9808759	0,5
21	Santos Dumont, 73	Centro	734737	9809635	2
22	Rua Lauro Sodré	Centro	735207	9809575	2,5
23	Rua 15 de agosto	Centro	735435	9809341	3,7
24	Rua Barão	Centro	734764	9809039	3,1
25	Rua Barão	Centro	734698	9808687	3
26	Rua Siqueira Mendes	Centro	734610	9808723	2
27	Rua Pedro Rodrigues	Centro	735363	9809095	1,7
28	Rua Pedro Rodrigues	Sta Rosa	735684	9809003	2
29	Rua Pedro Rodrigues	Sta Rosa	735709	9808983	2,7
30	Ao Lado do Posto Carvalho III	Sta Rosa	736027	9808937	3,9
31	Rua José Lídio	Sta Rosa	735913	9808717	2,9
32	Rua José Lídio	Sta Rosa	735780	9808483	2,2
33	Tv. Benedito Guerra	Sta Rosa	735856	9808421	0,5
34	Rua Domingos de Carvalho	Sta Rosa	735995	9808655	1,6
35	Tv. do Sertão	Sta Rosa	736151	9808711	1,7
36	Rua Domingos de Carvalho	Sta Rosa	736065	9808805	3
37	Rua Coronel Borges	Sta Rosa	735582	9808551	1,8
38	Rua Torquato	Sta Rosa	735552	9808465	1,6
39	Rua Maximiano	Sta Rosa	735639	9808433	2,4
40	Rua Padre Pimentel	Sta Rosa	734737	9809635	2
41	Rua Joaquim Mendes	Sta Rosa	735207	9809575	2,5
42	Rua Joaquim Mendes	Sta Rosa	735435	9809341	3,7

Os sistemas hidrogeológicos são formados por um conjunto de aquícludes, aquítares e aquíferos, pertencentes às unidades estratigráficas Pirabas, Barreiras e Cobertura Quaternária.

Para a região estudada, os sistemas hidrogeológicos identificados foram essencialmente: Aluviões; Pós-Barreiras e Barreiras.

As Aluviões estão relacionadas à cobertura sedimentar mais recente; o sistema Pós-Barreiras é relacionado aos sedimentos inconsolidados pertencentes à unidade estratigráfica de mesmo nome e o sistema Barreiras relaciona-se aos sedimentos do Grupo Barreiras (Tabela 8.2).

- ***Aluviões***

Na área estudada este sistema ocorre, principalmente, nas proximidades dos cursos hídricos superficiais mais importantes, em especial no oeste-noroeste de Abaetetuba.

- ***Pós-Barreiras***

As unidades aquíferas desse sistema são, em geral, de natureza livre, ou semiconfinada, localmente. Esse sistema apresenta alta vulnerabilidade junto às principais fontes externas de contaminação das águas subterrâneas, isso ocorre devido a ser um aquífero raso, muitas vezes em zonas de interação com postos de combustíveis, cemitérios, entre outros.

- ***Barreiras***

São aquíferos considerados de natureza semilivre a confinada, neste caso pela presença de camadas argilosas sucessivamente intercaladas nas areias, esse sistema ocorre em toda a área estudada.

Tabela 8.2 – Características Gerais dos Sistemas Hidrogeológicos da Área.

Sistemas Aquíferos	Profundidades de Ocorrência
Aluviões	Inferiores a 10 m.
Pós-Barreiras	Desde a superfície até 25 m, sendo quase sempre inferior a 25 m.
Barreiras	Geralmente estão entre 25 e 90 m.

8.3 ANÁLISE GERAL DESSES SISTEMAS NO CONTEXTO DA ÁREA ESTUDADA

Os sistemas aquíferos superiores Aluviões e Pós Barreiras encontram-se por toda a região e podem ocorrer na profundidade de 2 m onde normalmente “encontram-se” os tanques de combustíveis.

Um estudo detalhado feito na área permite afirmar que a população mais pobre se abastece desses sistemas através de poços escavados, construídos pela própria população.

Os aquíferos superiores, para fins de abastecimento humano, na maioria das vezes não apresentam água de boa qualidade uma vez que os mesmos, por serem rasos, tornam-se muito vulneráveis às principais fontes de contaminação das águas subterrâneas.

8.4 SUSCEPTIBILIDADE À CONTAMINAÇÃO DOS SISTEMAS AQUÍFEROS

O estudo da vulnerabilidade à contaminação do aquífero superior também é de extrema relevância, auxiliando na indicação das áreas mais susceptíveis a contaminação da água subterrânea na área.

Os aquíferos superiores desprovidos de camadas confinantes (Pós Barreiras) ou com essas camadas pouco espessas (Barreiras), representam grandes possibilidades de contaminação por hidrocarbonetos. Sabe-se que a vulnerabilidade é maior nesses

sistemas justamente pela ausência de uma camada confinante ou por sua pouca espessura.

Bandeira (2006), fez um estudo da vulnerabilidade para a região de Barcarena/PA, município vizinho de Abaetetuba. Nesse estudo a autora correlacionou o tema com a situação da área e verificou que a vulnerabilidade variou desde baixa até alta. Devido à proximidade e semelhança geológica, é possível que Abaetetuba apresente as mesmas características de vulnerabilidade observadas em Barcarena. Essas características encontram-se descritas abaixo:

- ***Vulnerabilidade Alta***

Corresponde às áreas com profundidade inferior a 5 m, subjacente a material de alta permeabilidade por porosidade, sem nenhum a pouco atenuante de conteúdo argiloso que retarde ou impeça a infiltração de elementos poluentes dispostos na superfície ou sub-superfície do terreno, onde se enquadra o sistema aquífero Pós-Barreiras.

- ***Vulnerabilidade Moderada***

Corresponde àquelas áreas onde ocorre água subterrânea explorável a profundidades de 5 a 15 m (Pós Barreiras), subjacente a um material pouco permeável ou onde ocorre material de alta permeabilidade.

- ***Vulnerabilidade Baixa***

Caracterizam-se por apresentarem, na zona não saturada, uma litologia composta por argila, areia fina e silte e onde o nível da água não é raso, chegando até 10 a 18 m.

8.5 ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA VULNERABILIDADE NO CONTEXTO DA ÁREA

Nas áreas classificadas como sendo de alta vulnerabilidade, o vazamento de contaminantes provenientes de postos de serviços é um grande problema, visto que os

tanques encontram-se a profundidades inferiores à 5 m e o contaminante terá contato direto com camadas extremamente porosas e permeáveis, ou até mesmo com a água desse sistema, o que causa um aceleramento no processo de contaminação.

Com base nessa classificação e comparando-se o sistema Pós Barreira com Barreiras, verificou-se que o Sistema Barreiras, por encontrar-se a uma profundidade maior e por apresentar camadas confinantes (mesmo que pouco espessas), responsáveis por proteger o aquífero da ação de fontes contaminantes, é o sistema superior que está menos vulnerável à contaminação, porém não estando isento desse tipo de problema.

8.6 FLUXOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS

O comportamento geométrico dos fluxos hídricos subterrâneos foi investigado através de um cadastro de poços construído para a área durante os trabalhos de campo (Tabela 8.1).

O conhecimento do fluxo de uma região auxilia na detecção de áreas de descarga de aquíferos e áreas de recarga de aquíferos. As áreas de recarga devem ser preservadas de qualquer fonte de contaminação. Através deste estudo pôde-se, também, delinear a direção do fluxo hídrico da região e estimar assim o sentido de propagação da “contaminação”.

A contaminação local de um aquífero local (no posto) afeta não apenas os usuários deste local, mas também aqueles situados ao longo da direção de fluxo subterrâneo. Assim, a contaminação por hidrocarbonetos pode alcançar grandes extensões dependendo do tipo de hidrocarboneto, do local (de descarga ou recarga) e da quantidade de vazamento dos tanques de combustíveis.

Portanto, visto a importância do conhecimento do fluxo subterrâneo dos aquíferos para este trabalho, foi realizado o estudo que encontra-se descrito a seguir.

8.6.1 Metodologia para a Construção do Mapa de Fluxo

Para o estudo dos fluxos subterrâneos do aquífero superior da área de Abaetetuba utilizou-se da seguinte metodologia:

- Quarenta e dois poços foram selecionados em etapas de campo, a seleção foi feita de modo a contemplar os bairros Centro, Santa Rosa e Aviação onde estão os postos de serviços;
- Cadastramento dos poços, através de duas visitas de campo;
- Para cada um dos 42 poços cadastrados, mediram-se os níveis estáticos, utilizando-se de um medidor de nível sonoro;
- Diminuiu-se da cota topográfica o valor do nível estático, obtendo-se assim, os valores dos potenciais hidráulicos que foram utilizados para determinação das isolinhas na caracterização da superfície potenciométrica e interpretação da direção e sentido do fluxo subterrâneo;
- Para a construção do mapa de fluxo subterrâneo foram relevantes as localizações geográficas de cada poço e seu valor de potencial hidráulico. Os dados foram tabulados e alimentados em programa computacional para a confecção de mapa de contornos de isovalores.

8.6.2 Interpretação dos Resultados

Para a análise dos dados foram construídos os mapas de profundidade do nível estático e de fluxo subterrâneo. Todos eles para o aquífero superior da região de Abaetetuba.

8.6.2.1 Comportamento do Nível Estático na Área de Estudo

De um modo geral os poços cadastrados na área não apresentaram variações consideráveis em suas profundidades. Analisando-se a Figura 8.4, pode se verificar que:

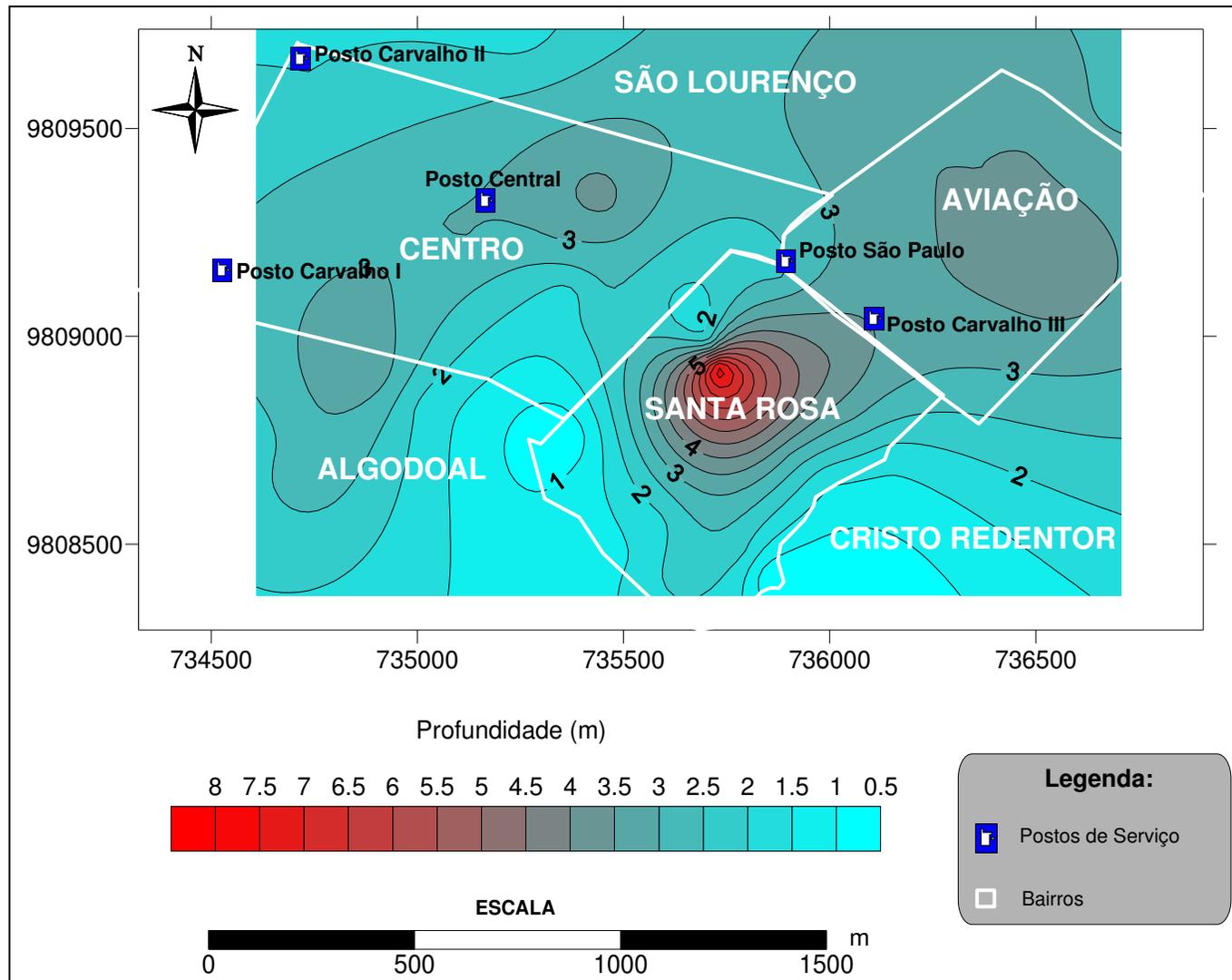


Figura 8.4 – Mapa de Profundidade do Nível Estático de Aquíferos Superiores da região central de Abaetetuba/PA.

As profundidades do lençol freático (nível estático) na área estudada variaram desde 0,5 m até 8 m, com uma média na profundidade de 2,7 m;

Cerca de 33% dos poços cadastrados na área monitorada apresentaram baixas profundidades variando entre 0,5 a 2m; 64% apresentaram profundidades entre 2,1 e 4m e apenas 2,4%, equivalente a um poço apresentou profundidade de 8 m.

Portanto, grande parte dos poços analisados na área, apresenta profundidade abaixo de 4 m, isso pode ser evidenciado em quase todas as direções do mapa, com exceção do setor centro-sul que apresenta um poço com profundidade de 8 m, localizado num hospital no bairro de Santa Rosa.

As áreas com aproximadamente 1 m de profundidade são observadas nas porções Sudeste, Sudoeste e Noroeste do mapa. Esse fato demonstra que grande parte da população se abastece das águas do aquífero superior, e que a vulnerabilidade é alta nessa área. Portanto, ocorrendo contaminação, ela terá chances maiores de alcançar rapidamente grandes extensões uma vez que em áreas de alta vulnerabilidade não se tem camadas impermeáveis que evitem o espalhamento da fonte contaminante.

O risco à contaminação é outro fator preocupante caso ocorra contaminação por derivados de petróleo na área, uma vez que a área estudada localiza-se numa região de vulnerabilidade alta, ocupada por grandes concentrações habitacionais, onde ocorrem áreas de recarga do aquífero.

O posto Carvalho II é o posto localizado na área de mais baixa profundidade de nível estático, em torno de 1,8 m. Os postos Carvalho I e São Paulo estão em uma área onde o nível estático alcança 2,5 m de profundidade, já o posto Central II alcança 3 m. O Posto Carvalho III está localizado em uma área onde o nível alcança 3,5 m de profundidade.

De acordo com esses dados pode-se pensar que se ocorrer vazamento nos tanques dos postos de serviços, poderá haver contato direto do contaminante com a água principalmente nos postos Carvalho II, Carvalho I, São Paulo e Central, uma vez que a profundidade dos tanques é, geralmente, em torno de dois metros.

Caso não ocorra o contato direto do contaminante com a água desses aquíferos, a contaminação poderá também ocorrer através da ação da porosidade e permeabilidade do solo que muito influenciam em profundidades inferiores a 5 m. Neste caso, porém, o processo de contaminação pode ser mais demorado.

Portanto, não é recomendável a captação das águas desse aquífero mais superior, para o abastecimento da população da área. Essas águas, mesmo aquelas em maiores profundidades, provêm de aquíferos livres, sem qualquer proteção natural e, por isso, como mencionado antes, são muito vulneráveis à contaminação por postos de serviços.

8.6.2.2 Comportamento do Fluxo Subterrâneo na Área de Estudo

O mapa de fluxo, representado na Figura 8.5, descreve o sentido do fluxo subterrâneo na região urbana central de Abaetetuba, que contempla os bairros onde estão locados os postos de serviços da área: Santa Rosa, Centro, Aviação e arredores.

Observam-se no mapa de fluxo oito áreas de descarga do aquífero superior, que são caracterizadas por um padrão convergente das setas que indicam o sentido do fluxo. A principal zona de descarga encontra-se na região centro-norte do bairro de Santa Rosa.

A figura mostra que o posto Carvalho II está localizado em uma área de descarga de aquíferos, isso deve ocorrer devido o mesmo estar bem próximo ao rio da cidade. O posto Carvalho III também está localizado às proximidades de uma área de descarga de aquíferos, outras áreas de descarga são observadas na região leste do bairro do Centro; no setor sudoeste do mapa próximo aos poços 25 e 26, localizados no bairro de Algodal; no setor sudoeste do mapa, no limite dos bairros Algodal e Santa Rosa.

Foram observadas cinco zonas de recarga de aquíferos no mapa de fluxo, essas zonas podem ser reconhecidas por uma padrão divergente das setas que indicam o sentido do fluxo.

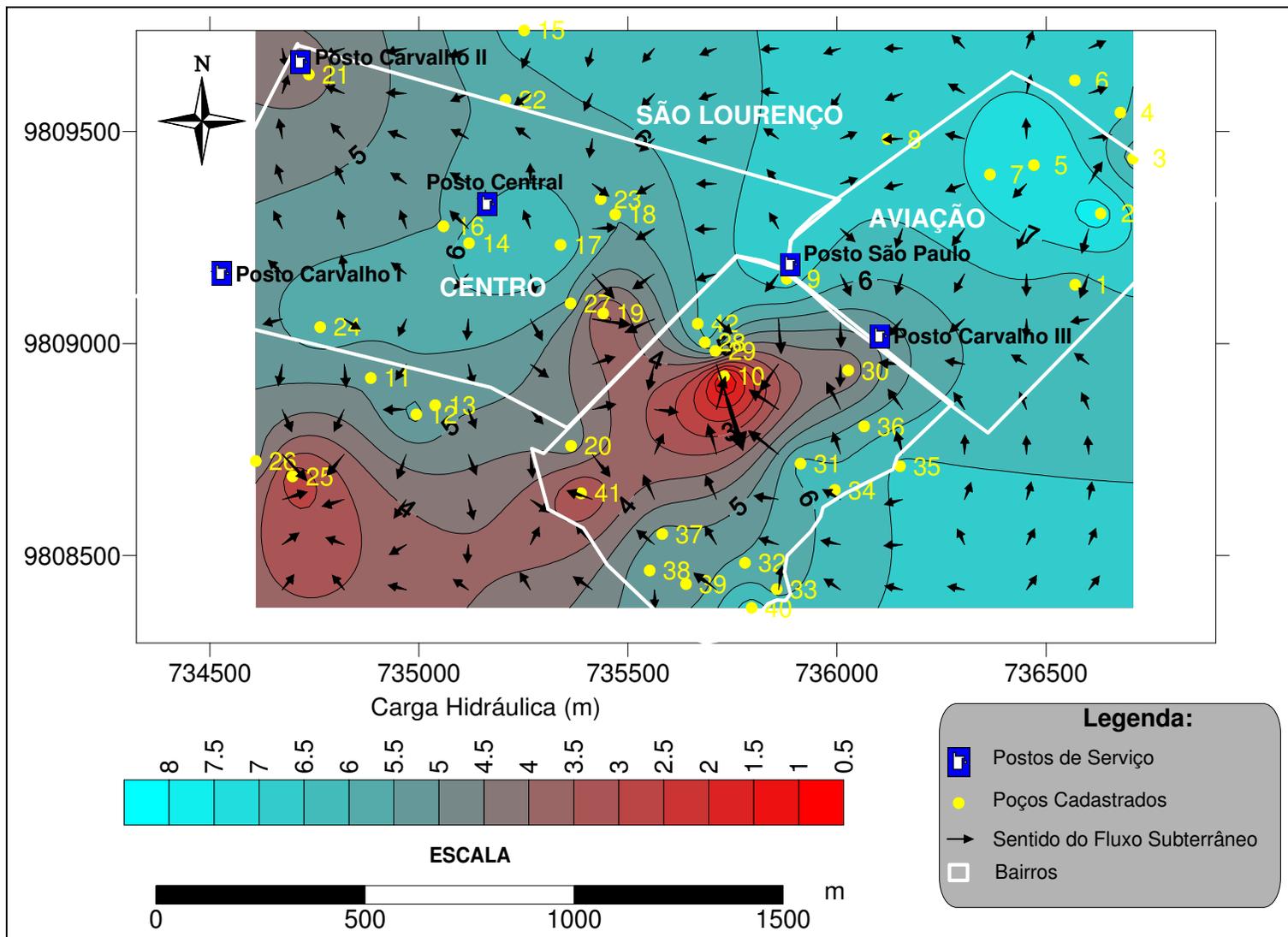


Figura 8.5 – Mapa de Fluxo Subterrâneo para o Aquífero Superior na região central de Abaetetuba/PA.

As principais zonas de recarga encontram-se: 1) na porção oeste do bairro do Centro onde está localizado o posto Carvalho I; 2) Na região de intersecção dos bairros Centro, Santa Rosa e Aviação, o posto São Paulo está localizado nessa área e 3) Na região central do bairro do Centro, onde estão localizados os poços 14, 16 e 17; observa-se que o posto Central está instalado bem próximo a essa região.

As áreas de recarga do aquífero superior são muito importantes do ponto de vista ambiental e devem ser protegidas uma vez que, se essas áreas forem contaminadas, podem atingir uma grande extensão do aquífero. Os postos Carvalho I, São Paulo e Central, por estarem localizados em áreas de recarga do aquífero superior, causam um sério risco para o meio ambiente.

A contaminação proveniente de vazamentos de tanques de postos de serviços localizados numa área de recarga de aquífero poderá contribuir para uma série de problemas para a saúde das pessoas que delas se abastecem, além de causar danos irreparáveis às reservas de água no subsolo.

9 LEVANTAMENTO COM GPR EM POSTOS DE SERVIÇOS DA REGIÃO URBANA DE ABAETETUBA

A área urbana de Abaetetuba é composta por 14 bairros: Centro, Aviação, Santa Rosa, Cafezal, Cristo Redentor, São Lourenço, São Sebastião, Francilândia, Algodal, Cafezal, S.D. Angélica, Santa Clara, Mutirão e Castanhal, além do loteamento Jardim América (Figura 9.1). Os postos de serviços localizados nessa região são os objetos de interesse desta dissertação.

Foi visto anteriormente que os postos de serviços podem ser responsáveis por grandes danos ao meio ambiente e à população, caso seus tanques subterrâneos estejam provocando vazamentos de derivados de petróleo (gasolina e óleo diesel) no subsolo.

Sabe-se que a vida útil de um tanque de combustível é de 20 anos, quando ele está devidamente protegido, porém essa vida útil passa a ser de 10 anos quando o tanque encontra-se sem nenhuma proteção. Vazamentos dos tanques podem ser provocados por diversos fatores, entre os quais a idade do tanque e a sua corrosão. O fator corrosão é um grave problema na região amazônica, cuja água do subsolo tem caráter extremamente ácido, o que provoca uma rapidez maior nesse processo, podendo acelerar o vazamento e provocar a contaminação.

Apresenta-se a seguir uma descrição das características dos postos de serviços da região urbana de Abaetetuba, que foram coletadas durante consulta bibliográfica e trabalho de campo. Descreve-se, também a metodologia usada na coleta de dados com o GPR e a análise e interpretação desses dados.

9.1 POSTOS DE SERVIÇOS DA REGIÃO URBANA DE ABAETEUBA

A área urbana de Abaetetuba apresenta 14 bairros, entretanto os postos de serviços presentes na região concentram-se em somente três deles, que são Aviação, Centro e Santa Rosa (Figura 9.1).

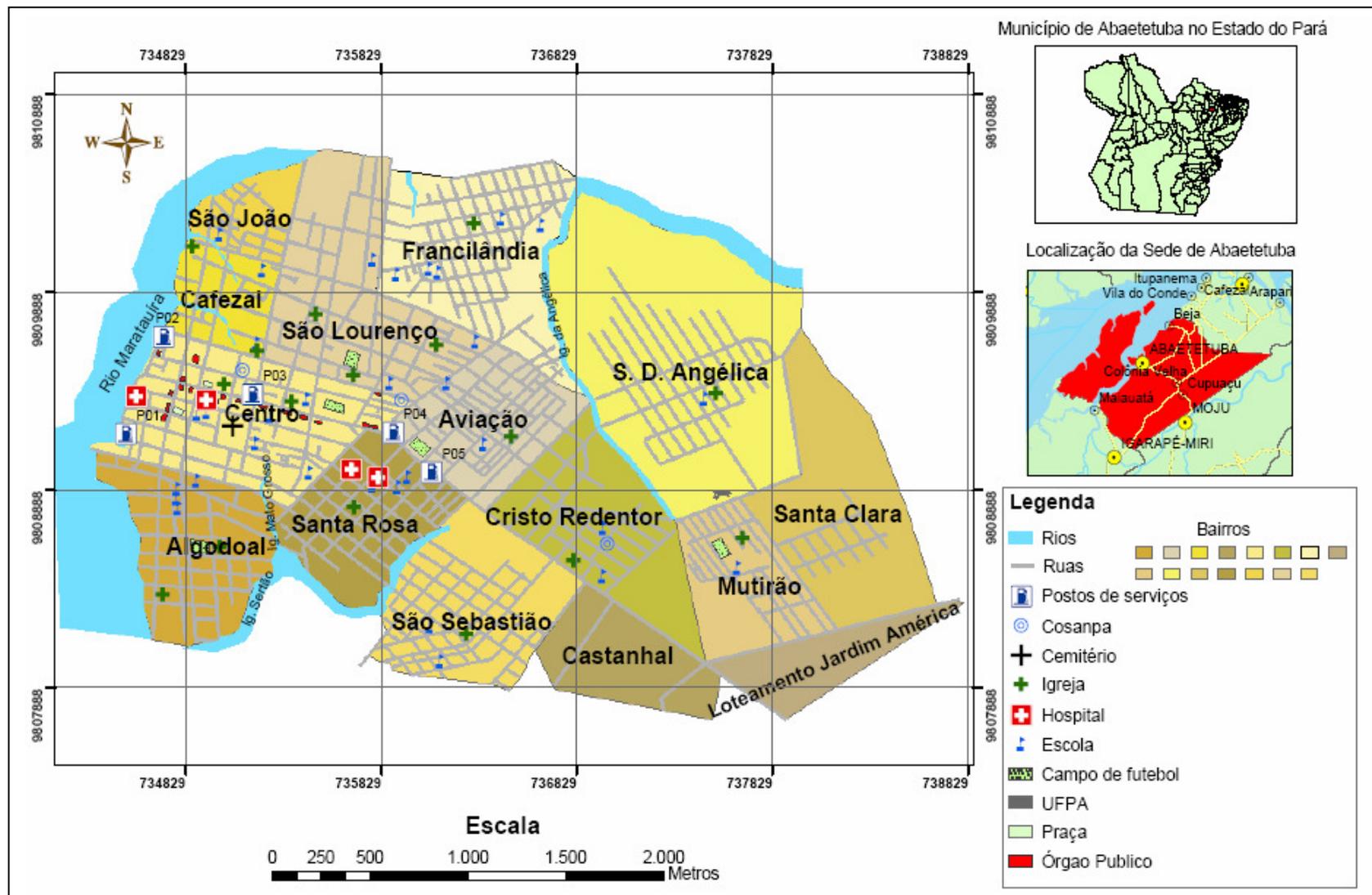


Figura 9.1 – Mapa Urbano de Abaetetuba.

Os bairros Aviação, Centro e Santa Rosa fazem parte da região central e arredores do centro urbano de Abaetetuba e estão diretamente interligados, sendo muito próximos uns dos outros. É neles que estão concentrados os principais elementos urbanos e a área comercial do município.

Em meio a pesquisas feitas no quadro de endereços de postos de serviços da Agência Nacional do Petróleo (ANP), disponível em seu site na internet, somado a visitas de campo para a realização da logística da área, pôde-se comprovar a presença de seis postos de serviços apresentados como: posto A.P.S. Pimenta E Cia. (balsa flutuante), posto Carvalho I, posto Carvalho II, posto Carvalho III, posto São Paulo e posto Central.

O posto A.P.S. Pimenta & Cia. situa-se sobre uma balsa flutuante localizada na margem direita do rio Maratauíra, que margeia a sede do município. Os postos Carvalho I, Carvalho II e Central estão localizados no bairro do Centro (Figura 9.2), sendo que os postos Carvalho I e Carvalho II se encontram às margens do rio Maratauíra, porém em terra. O posto Carvalho III está localizado no bairro Santa Rosa e o posto São Paulo no bairro Aviação (Figura 9.2).

A tabela 9.1 mostra os principais resultados do levantamento feito a partir de dados disponíveis no site da Agência Nacional do Petróleo (ANP), com as principais características dos postos de serviços atuantes em Abaetetuba. Esses dados contemplam informações como o endereço do posto, o fornecedor do combustível, CNPJ e data de licenciamento do posto perante a ANP.

A tabela 9.2 mostra os resultados do levantamento de campo sobre os postos. Esse levantamento permitiu checar as informações adquiridas com a pesquisa bibliográfica, além de produzir informações novas e de grande importância para este trabalho.

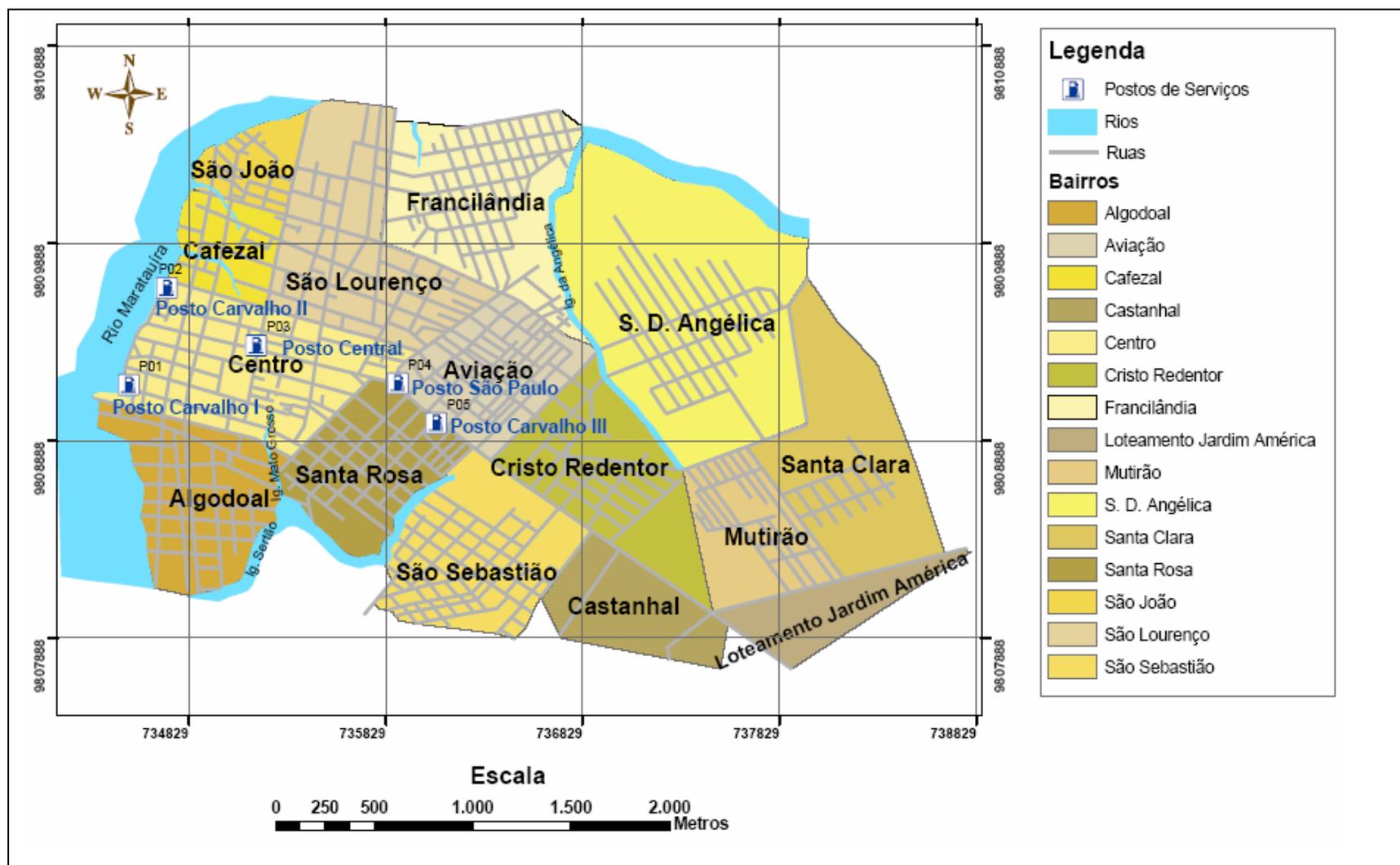


Figura 9.2 – Mapa de localização dos postos de serviços de Abaetetuba.

Para fazer o levantamento nos postos de serviços da área utilizou-se como ferramenta de localização o mapa urbano adquirido na Prefeitura do município. A partir disso, visitou-se cada um dos postos, com exceção do posto flutuante. Foram verificadas as características locais mais evidentes e suas localizações em coordenadas UTM (sistema WGS 84) tiradas com auxílio de um GPS (Tabela 9.3).

Para a caracterização local dos postos foi aplicado um questionário oral aos seus proprietários, esse questionário incluiu aspectos que contemplaram desde os dados gerais, tais como: nome do posto, proprietário, endereço e bandeira de funcionamento, até os tipos de derivados de petróleo vendidos em cada posto, tipos e capacidade dos tanques de armazenamento subterrâneos, idade do posto, histórico de contaminação local proveniente de combustíveis, além de outras características relevantes a este estudo.

O questionário foi aplicado aos proprietários dos postos visando checar os dados fornecidos pela pesquisa bibliográfica preliminar e, assim, poder dispor de informações verdadeiras sobre a história do posto.

A seguir serão descritas as características mais relevantes de cada posto, examinadas a partir da análise do questionário empregado.

- ***Posto Carvalho I***

O posto Carvalho I, localizado no bairro do Centro às margens do rio Maratauíra, foi implantado no ano de 1969 com a bandeira Petróleo SABBA-SHELL, na forma de tanques aéreos. Em 1986 os tanques passaram a ser subterrâneo, inicialmente de ferro. Em meados dos anos 90, foram trocados de tanques de ferro para tanques ecológicos.

Considerando o ano de implantação do posto Carvalho I em 1969, ele tem a idade de 37 anos. Os tanques se tornaram subterrâneos há 20 anos e há aproximadamente 10 anos houve a mudança de tanques de ferro para tanques ecológicos.

Tabela 9.1 – Características dos poços de serviços da área urbana de Abaetetuba.

Município	Nome do Posto	Número de Despacho	Licenciamento	Observações
Abaetetuba	Posto Carvalho III	ANP N° 536	15/09/2000	Posto com cadastro atualizado/ Autorização: PA0001090
Abaetetuba	Posto Central	ANP N°1006	19/10/2001	Posto com cadastro atualizado/ Autorização: PA0014731
Abaetetuba	Posto São Paulo	ANP N° 318	11/04/2003	Posto com cadastro atualizado/ Autorização: PA0031183
Abaetetuba	Posto Carvalho II	ANP N° 832	14/09/2001	Posto com cadastro atualizado/ Autorização PA0012606
Abaetetuba	Posto Carvalho I	ANP N° 507	30/05/2001	Posto com cadastro atualizado/ Autorização: PA0009635
Abaetetuba	A.P.S. Pimenta/ Balsa Flutuante	ANP N° 245	27/03/2002	Posto com cadastro atualizado/ Autorização: PA0024333

Fonte: Segundo dados da ANP.

Dentre os combustíveis comercializados pelo posto estão a gasolina comum, gasolina aditivada e o óleo diesel, o posto também dispõe de produtos como lubrificantes e querosene. O posto possui 4 bombas de combustíveis divididas em diesel comum, gasolina comum, gasolina aditivada e querosene, além de 6 tanques sendo 2 flutuantes e 4 terrestres. Os quatro tanques terrestres estão divididos em tanque de diesel com capacidade de 45 mil litros; tanque de gasolina comum com capacidade para 10 mil litros; tanque de gasolina aditivada com capacidade para 10 mil litros e tanque de querosene com capacidade para 15 mil litros. A Bandeira atual de revenda é a PDV Brasil.

O posto Carvalho I apresenta diversas características que mostram a preocupação do proprietário do posto em cumprir com as normas ambientais propostas pelos órgãos competentes e, assim, obter o funcionamento regular do posto de serviço.

Dentre as características do posto que foram observadas está a presença de uma caixa separadora, que é responsável por separar o óleo da água. Essa caixa é dimensionada para atender a demanda de 2 litros de água por hora.

Existe no posto uma canaleta de drenagem direcionada a evitar qualquer tipo de contaminação. Há também bombas coletoras de água e uma ligação de tubos que permite atender não somente a parte terrestre, mas também a fluvial.

O posto usa tubos de PVC desenhados para resistir ao peso do solo, um fator importante já que este tipo de tubulação não permite vazamento de combustíveis ao subsolo.

O posto apresenta cadastro atualizado junto a ANP e é, atualmente, o posto da região que mais atende às normas ambientais do Código Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) - órgão Federal - através da lei n 273, e da Secretaria de Meio Ambiente (SECTAM) – órgão Estadual. O posto se adequou à portaria do CONAMA no ano de 2003.

Tabela 9.2 – Características dos poços de serviços da área urbana de Abaetetuba observadas no levantamento de campo.

Postos	Coordenadas E UTM	Coordenadas S UTM	Proprietário	Idade do Posto	Produtos Comercializados	Número de Bombas e Tanques
Posto Carvalho I	734523	9809170	Ernane Carvalho Filho	20 anos (tanques já foram trocados)	Óleo Diesel, Gasolina Comum e Aditivada, Querosene e Lubrificante.	4 bombas; 4 tanques terrestres e 2 flutuantes
Posto Carvalho II	734716	9809662	Ernane Carvalho Filho	20 anos (tanques trocados em 1998)	Óleo Diesel Comum, Gasolina Comum e Aditivada, Querosene.	4 bombas; 5 tanques terrestres e 2 flutuantes
Posto Central	735159	9809342	Francisco Filho	28 anos (tanques nunca foram trocados)	Óleo Diesel Comum e Gasolina Comum.	5 bombas; 5 tanques
Posto São Paulo	735889	9809180	J. Lino	Aproximadamente e 10 anos (tanques nunca foram trocados)	Óleo Diesel Comum, Gasolina Comum e Aditivada.	5 bombas; 4 tanques
Posto Carvalho III	736099	9809018	Ernane Carvalho Filho	3 anos (tanques nunca foram trocados)	Óleo Diesel Comum e Aditivado, Gasolina Comum e Aditivada, Álcool.	6 bombas; 3 tanques

- **Posto Carvalho II**

O posto Carvalho II, também localizado no bairro do Centro às margens do rio Maratauíra, pertence ao mesmo proprietário do posto Carvalho I.

Foi implantado no ano de 1969, na forma de tanques aéreos. Nos anos 70 os tanques passaram a serem subterrâneos, inicialmente de ferro. Em 1998 os tanques de ferro foram trocados para tanques intersticiais com parede dupla.

O posto tem a idade de 37 anos e há 20 anos passou a ter tanques subterrâneos. Há 8 anos teve mudados os tanques de ferro para tanques intersticiais com parede dupla.

Os combustíveis derivados de petróleo comercializados pelo posto Carvalho II são a gasolina comum, gasolina aditivada e o óleo diesel. O posto também dispõe de produtos como querosene. O posto revende combustíveis da TEXACO.

Existem 4 bombas de combustíveis no posto Carvalho II, as quais estão divididas em bomba de diesel comum, bomba de gasolina comum, bomba de gasolina aditivada e bomba de querosene.

O posto dispõe de 5 tanques, todos terrestres, divididos em: 2 tanques de diesel com capacidade de 30 mil litros cada um; 1 tanque dividido em dois sendo um com capacidade de 15 mil litros de gasolina comum e o outro com capacidade de 15 mil litros de diesel; os outros 2 tanques dividem ou separam-se em três (gasolina aditivada, óleo diesel e querosene) cada um com capacidade de 10 mil litros.

Observa-se uma preocupação do proprietário com a adequação do posto às normas ambientais propostas pelos órgãos competentes.

Observaram-se diversas características locais do Posto Carvalho II; entre as mais importantes estão: presença de uma caixa separadora de óleo e água, que atende a 2 litros de água por hora, e presença de poço tubular particular, para abastecimento de água.

Há uma canaleta de drenagem direcionada a evitar qualquer tipo de contaminação. Há também bombas coletoras de água e uma ligação de tubos que permite atender não somente a parte terrestre, mas também a fluvial.

O posto usa tubos de PVC, que resistem ao peso do solo. Apresenta cadastro atualizado junto a ANP e é, atualmente, um dos postos da região que passou a se adequar às normas do CONAMA e da SECTAM.

- ***Posto Central***

O posto Central, localizado na Avenida D. Pedro II, uma das principais vias do bairro do Centro, foi implantado no ano de 1978 com tanques subterrâneos de ferro.

Os tanques de ferro implantados em 1978, portanto há mais de 28 anos, nunca foram trocados. Isso pode estar acarretando sérios problemas para o meio ambiente. Em termos de funcionamento de tanque de ferro, o posto Central é o posto mais antigo da área urbana de Abaetetuba.

Considerando que a vida útil de um tanque de combustível é de 20 anos e que a partir daí ele está sujeito a corrosões, o posto Central tem um potencial enorme de contaminação. Principalmente, porque está na região amazônica onde a água tem caráter mais ácido e, portanto, maior poder de corrosão.

O posto Central dispõe de 5 bombas de combustíveis, sendo 2 bombas de óleo diesel comum; 2 bombas de gasolina comum e 1 bomba de álcool desativada há cerca de 6 anos aproximadamente.

Os combustíveis derivados de petróleo comercializados pelo posto Central são: a gasolina comum e o óleo diesel comum; o posto comercializava anteriormente álcool. O posto revende combustíveis de bandeira BRANCA.

O posto possui 5 tanques subterrâneos, porém somente 4 deles estão em funcionamento e dividem-se entre gasolina comum e diesel comum. O quinto tanque armazenava álcool e encontra-se desativado.

Visivelmente, não se observou no posto Central preocupações demasiadas em adequar-se às exigências propostas para a implantação ou regulamentação dos postos de serviços, por parte dos órgãos federal e estadual, CONAMA e SECTAM. Por exemplo, foram observadas no posto, manchas no piso, provavelmente provenientes de derramamentos de combustíveis, porém não se pode confirmar tal proveniência.

Durante nossas visitas ao posto nunca foi possível contactar o proprietário. Portanto, a disponibilidade de informações em relação ao posto Central foi comprometida em virtude dessa ausência, tornando-se difícil a sua descrição detalhada.

- ***Posto São Paulo***

O posto São Paulo está localizado na avenida D. Pedro II, que é considerada uma das principais avenidas do bairro da Aviação, o referido posto foi implantado no ano de 1998, já com tanques de ferro subterrâneos.

Os tanques de ferro implantados juntamente com o início de funcionamento do posto nunca foram trocados, o que pode estar causando problemas graves ao meio ambiente, embora o posto seja relativamente novo.

A idade do posto São Paulo é de aproximadamente 8 anos, sendo um dos postos mais novos da região. Entretanto, o posto não se adequa aos padrões ambientais propostos para o funcionamento correto de um posto de serviço.

Dentre os combustíveis derivados de petróleo comercializados pelo posto estão a gasolina comum, gasolina aditivada e o óleo diesel.

O posto apresenta 5 bombas de combustíveis divididas em 3 bombas de diesel; 2 bombas de gasolina comum e 1 bomba de gasolina aditivada. Ele dispõe de 4 tanques subterrâneos, todos com capacidade para armazenar 15 mil litros, sendo 2 tanques de diesel e 2 tanques de gasolina. O posto comercializa combustíveis de bandeira BRANCA.

Não se observou no posto São Paulo elementos que indicassem ou se adequassem às exigências ambientais propostas para a implantação ou regulamentação dos postos de serviços, por parte dos órgãos federal e estadual, CONAMA e SECTAM, porém ele apresenta cadastro atualizado junto a ANP.

As informações relacionadas ao posto São Paulo foram poucas, o proprietário não sabia informar sobre aspectos como tubulação, capacidade de armazenamento e

tipo de tanque, entre outras características que constituiriam dados importantes nessa investigação.

Foram observadas algumas canaletas de drenagem no posto, direcionadas a evitar contaminação.

O posto não possui poço de abastecimento próprio e para seu abastecimento utiliza água da COSANPA.

- ***Posto Carvalho III***

O posto Carvalho III está localizado na Av. Dom Pedro II, no bairro de Santa Rosa. É o único posto deste bairro e diferentemente dos outros postos da região apresenta-se em uma área de menos aglomerado urbano, ficando na entrada da cidade.

O posto Carvalho III foi implantado e inaugurado no ano de 2003. O posto revende combustíveis da PDV Brasil. Os tanques do posto sempre foram subterrâneos e ainda não foram trocados. O posto Carvalho III é o posto mais novo da zona urbana de Abaetetuba, com a idade de aproximadamente 3 anos.

O posto Carvalho III dispõe de 6 bombas de combustíveis divididas em 2 bombas de diesel comum, 1 bomba de diesel aditivado, 1 bomba de gasolina comum, 1 bomba de gasolina aditivada e 1 bomba de álcool.

O posto apresenta 3 tanques, em que 1 deles divide-se ou separa-se em 3 com capacidade de 10 mil litros cada um; os outros dois tanques dividem-se em 2 partes com capacidades de 15 mil litros cada uma.

O posto Carvalho III, como os postos Carvalho I e Carvalho II, apresenta diversas características que mostram a preocupação do proprietário em cumprir com as normas ambientais propostas pelos órgãos competentes e, assim, obter o funcionamento regular do posto.

Entre as diversas características observadas no posto estão a presença de uma caixa separadora, que é responsável por separar o óleo da água. A caixa é

dimensionada para atender a demanda de 2 litros de água por hora. Existem no posto canaletas de drenagem direcionadas a evitar qualquer tipo de contaminação, há também bombas coletoras de água. O posto usa tubos de PVC. Apresenta cadastro atualizado junto a ANP e é um dos postos da região que melhor atende as normas ambientais do CONAMA e da SECTAM.

9.2 COLETA DE DADOS COM GPR

O levantamento com GPR foi feito nas áreas paralelas e perpendiculares aos tanques e às bombas de combustíveis dos postos (Figuras 9.3 e 9.4).

O equipamento GPR utilizado nas medidas é modelo SIR System-3000 da empresa Geophysical Survey Systems Inc (GSSI). Utilizou-se uma antena de 400 MHz, e registro com janela de tempo de 50 ns. Também foi testada uma antena de 200 MHz, que não mostrou boa resposta. Foi feita a amostragem no modo tempo com inserção de marcas no registro a cada 5 m. O posicionamento das marcas foi controlado por trena.



Figura 9.3 – Levantamento com GPR realizado paralelo às bombas de combustíveis.



Figura 9.4 – Levantamento com GPR realizado perpendicular aos tanques subterrâneos de combustíveis.

Os perfis de GPR realizados na área tiveram seus comprimentos variando de 15 a 75 m. A Tabela 9.3 sumariza as características desses perfis.

9.3 ANÁLISE DOS DADOS DE GPR NOS POSTOS DE SERVIÇOS DE ABAETETUBA

Para realizar o levantamento visando obter boas respostas de GPR nos postos de serviços verificaram-se diversos fatores, entre eles as facilidades de acesso e área livre presente nos postos, bem como a localização dos tanques de combustíveis. Para a caracterização do sinal GPR na área estudada, foram executados 26 perfis nos 5 postos de serviços da área urbana do município (Tabela 9.3). Esses perfis foram realizados próximo aos tanques segundo direções paralelas e perpendiculares e nas áreas próximas às bombas de combustíveis.

Tabela 9.3 – Características dos perfis GPR realizados na área dos postos de serviços de Abaetetuba.
(continua)

<i>Perfil/File</i>	<i>Localização</i>	<i>Comprimento</i>	<i>Início</i>	<i>Fim</i>	<i>Observações</i>
Perfil_01 File_052	Posto São Paulo	30m	735901 9809172	735882 9809174	Anomalia entre 15 e 20m do perfil e outra anomalia (estrutural? Pode ser algum tubo!) bem grande próxima de 20m. Av. D. Pedro II
Perfil_02 File_053	Posto São Paulo Eliminado	30m	735901 9809172	735882 9809174	Perfil muito ruim, não sendo possível trabalhar com a antena de 200MHz, portanto terá que trabalhar somente com a de 400MHz. Av. D. Pedro II
Perfil_03 File_054	Posto São Paulo	50m	735882 9809174	735914 9809214	Início do perfil 3 = fim do perfil 1 e 2. Perpendicular ao perfil 2. Presença de tanques de gasolina aditivada, gasolina, diesel e álcool. Av. São Paulo.
Perfil_04 File_055	Posto São Paulo	40m	735893 9879170	735920 9809210	Perfill, dentro do posto, entre as aberturas dos tanques de gasolina aditivada, diesel e gasolina comum.
Perfil_05 File_056	Posto São Paulo	15m	735903 9809178	735892 9809188	Perfil, dentro do posto, perpendicular ao perfil 4. O professor conseguiu ver as posições dos tanques.
Perfil_06 File_057	Posto São Paulo	15m	735906 9809194	735900 9809200	Perfil dentro do posto.
Perfil_07 File_058	Posto Central	75m	735162 9809338	735180 9809414	Rua Lauro Sodré.
Perfil_08 File_059	Posto Central	30m	735162 9809338	735132 9809342	Perfil perpendicular ao perfil . Rua D. Pedro II
Perfil_09 File_060	Posto Central	55m	735150 9809340	735160 9809394	Perfil, dentro do posto, paralelo a Rua Lauro Sodré.
Perfil_10 File_061	Posto Central	25m	735165 9809346	735199 9809352	Perfil, dentro do posto, paralelo a D. Pedro II.
Perfil_11 File_062	Posto Central	20m	735172 9809380	735153 9809384	Perfil, dentro do posto, paralelo a D. Pedro II.
Perfil_12 File_063	Posto Central	20m	735169 9809360	735149 9809364	Paralelo a D. Pedro II.
Perfil_13 File_064	Posto Carvalho II	40m	734691 9809680	734731 9809672	Perfil, dentro do posto, paralelo a Santos Dumont e perpendicular a Justo Chermont. Distribuição de gasolina comum e aditivada, querosene e óleo diesel
Perfil_14 File_065	Posto Carvalho II	25m	734699 9809688	734693 9809662	Perfil, dentro do posto, paralelo a Justo Chermont; próximo à beira do rio.

(
(conclusão)

<i>Perfil/File</i>	<i>Localização</i>	<i>Comprimento</i>	<i>Início</i>	<i>Fim</i>	<i>Observações</i>
Perfil_15 File_066	Posto Carvalho II	35m	734689 9809664	734725 9809662	Perfil paralelo a Santos Dumont e perpendicular a Justo Chermont.
Perfil_16 File_067	Posto Carvalho II	25m	734717 9809680	734710 9809658	Perfil, dentro do posto, paralelo a Justo Chermont, mas longe do rio.
Perfil_17 File_068	Posto Carvalho I	50m	734500 9809198	734547 9809178	Perpendicular a Rua Justo Chermont e Pedro Pinheiro Paiva.
Perfil_18 File_069	Posto Carvalho I	65m	734485 9809156	734550 9809172	Perpendicular a Rua Justo Chermont e paralela a Pedro Pinheiro
Perfil_19 File_070	Posto Carvalho I	50m	734513 9809206	734491 9809154	Perfil na beira do rio, paralelo a Rua Justo Chermont.
Perfil_20 File_071	Posto Carvalho I	45m	734494 9809168	734528 9809172	Perfil, dentro do posto, paralelo a Pedro Pinheiro e cortando a Justo Chermont.
Perfil_21 File_087	Posto Carvalho I	20m	734514 9809178	734527 9809162	Perfil, dentro do posto, perpendicular a Pedro Pinheiro. Levantamento feito em cima dos tanques isolados.
Perfil_22 File_088	Posto Carvalho III	45m	736095 9809022	736076 9808988	Paralelo a José Latino.
Perfil_23 File_089	Posto Carvalho III	50m	736095 9809022	736144 9809000	Paralelo a D. Pedro II.
Perfil_24 File_090	Posto Carvalho III	40m	736087 9808998	736120 9808978	Perfil, dentro do posto, paralelo a Rua D. Pedro II. Cruza tanques (área sem canaletas).
Perfil_25 File_091	Posto Carvalho III	45m	736132 9809008	736107 9809970	Perfil, dentro do posto, paralelo a Rua José Latino.
Perfil_26 File_092	Posto Carvalho III	40m	736088 9809014	736122 9808992	Perfil dentro do posto, entre as bombas; paralelo a Rua D. Pedro II (Dr. João Miranda). Cruza a canaleta com metal a 5m e a 27,5m.

De acordo com os dados de GPR obtidos e com informações adicionais adquiridas para cada um dos postos, eles foram classificados em duas categorias: Suspeitos de Contaminação e Possivelmente Contaminados. Os postos possivelmente contaminados apresentam idade superior a 20 anos, além de histórico de contaminação, que pode ser comprovado nos perfis GPR pela presença de zonas de baixa reflexão. Os postos classificados como suspeitos de contaminação também apresentaram em seus perfis GPR zonas de baixa reflexão, que poderiam ter sua causa associada tanto à contaminação como à elevada argilosidade do subsolo.

9.3.1 Postos Possivelmente Contaminados

Dentre os postos de serviços analisados neste trabalho, dois foram classificados como possivelmente contaminados devido ao histórico de contaminação, idade superior a 20 anos e por apresentar nas seções GPR zonas de baixa reflexão, características desse tipo de impacto. Os postos assim classificados foram: o Posto Central e o Posto Carvalho I. A análise dos dados de GPR coletados nesses postos encontra-se descrita a seguir:

- ***Análise dos perfis executados no Posto Central***

O posto Central localiza-se em uma das principais vias urbanas do município. Neste posto foram realizados 6 perfis GPR com comprimentos variando de 20 a 75 m (Tabela 9.3) . A Figura 9.5 mostra a planta esquemática do posto, com a localização das seções GPR.

Os perfis GPR levantados no posto Central apresentaram zonas de baixa reflexão (intensa) bastante extensas ocorrendo normalmente na parte superior dos perfis, essas zonas, muitas vezes, se estendiam por todo comprimento do perfil, bolsões de zonas de baixa reflexão também foram observados em alguns perfis.

O perfil 7 (Figura 9.6) tem comprimento de 75 m e foi feito paralelo à rua Lauro Sodré que passa ao lado do posto (Figura 9.5).

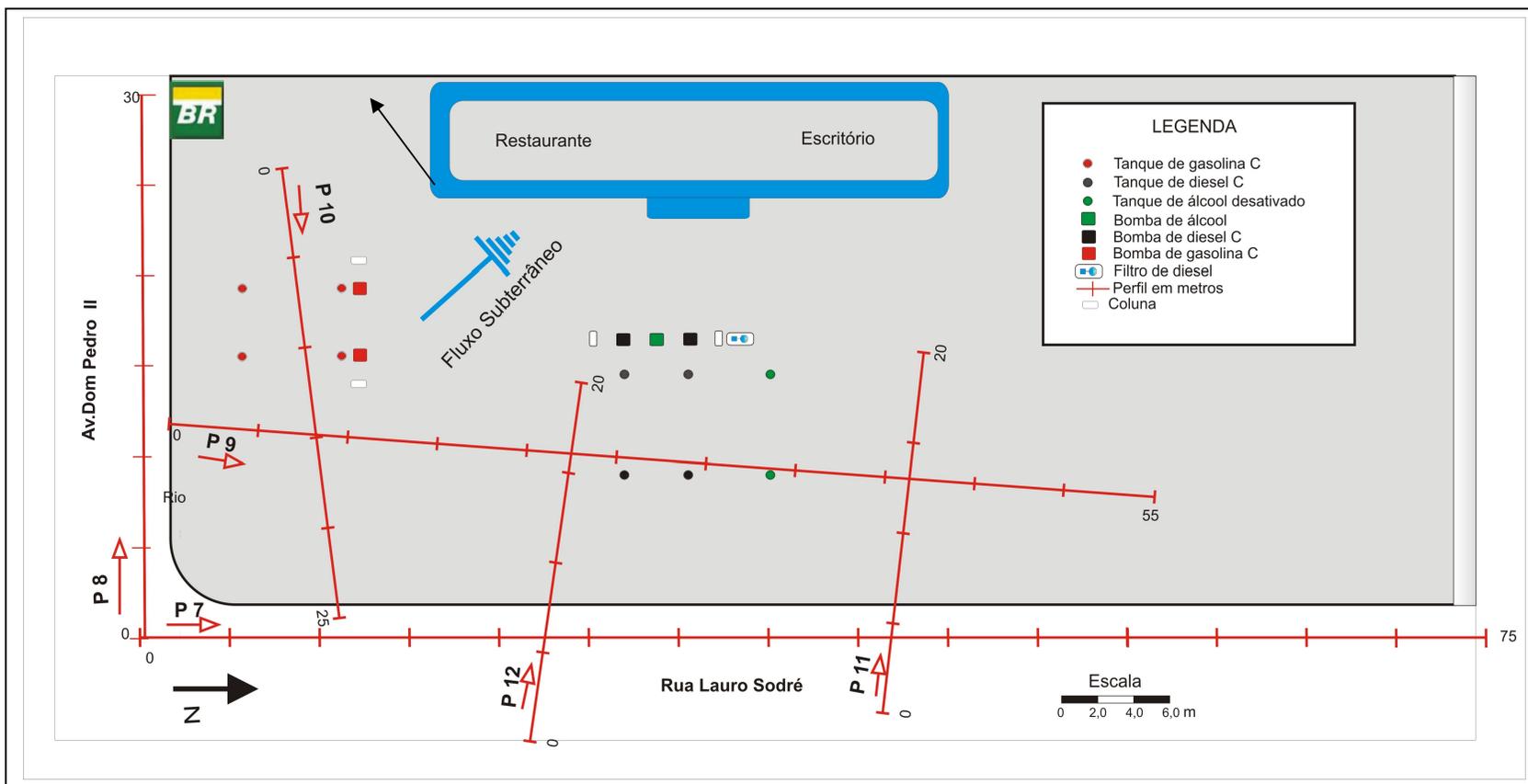


Figura 9.5 – Planta esquemática do posto Central com a localização dos perfis GPR. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.

Na parte mais superior do perfil foi observada uma zona lateral contínua de baixa reflexão intensa, logo abaixo dessa zona percebe-se uma camada de boa reflexão também contínua lateralmente que vai se estreitando na porção oeste do radargrama. Bolsões caracterizados por zonas de baixa reflexão (pouco intensa) são observados na porção oeste do radargrama, iniciando nas profundidades em torno de 1 metro e se estendendo verticalmente a profundidades maiores.

O perfil 8, representado na Figura 9.7, tem 30m de comprimento e foi feito paralelamente à rua D. Pedro II sendo perpendicular ao perfil 7 (Figura 9.5). Observa-se na porção mais superior desse perfil uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por todo o seu comprimento.

Em torno de 1 m de profundidade, percebe-se a existência de uma camada com boa reflexão que vai modificando lateralmente para uma zona de baixa reflexão pouco intensa que domina o radargrama a partir dessa profundidade, o que pode indicar a presença de um terreno ou material mais condutivo presente na subsuperfície. Duas formas hiperbólicas evidenciadas no perfil são provavelmente causadas por tubulações.

O perfil 9, representado na Figura 9.8, tem 55 metros de comprimento e foi feito dentro do posto, em uma área próxima aos tanques de diesel e ao de álcool desativado, paralelo à rua Lauro Sodré (Figura 9.5). Nele é possível observar registros com forte amplitude, na forma de hipérboles, causados pelos tanques subterrâneos.

As formas hiperbólicas formam um contraste lateral em subsuperfície com uma zona extensa de baixa reflexão, onde ocorre uma acentuada perda do sinal eletromagnético. Observa-se ainda, em torno de 1 m de profundidade, uma camada com boa reflexão interrompida por zonas extensas de baixa reflexão e algumas sob a forma de bolsões que chegam a mais de 2 m de profundidade. Essas zonas provavelmente indicam contaminação pelo diesel.

O perfil 10, representado na Figura 9.9, apresenta 25 m de comprimento e foi executado próximo às áreas dos tanques de gasolina do posto, paralelo a Avenida Dom Pedro II (Figura 9.5). Esse perfil mostra a existência de uma zona onde ocorre a total perda de sinal (zona de baixa reflexão intensa) que se estende por todo comprimento do perfil.

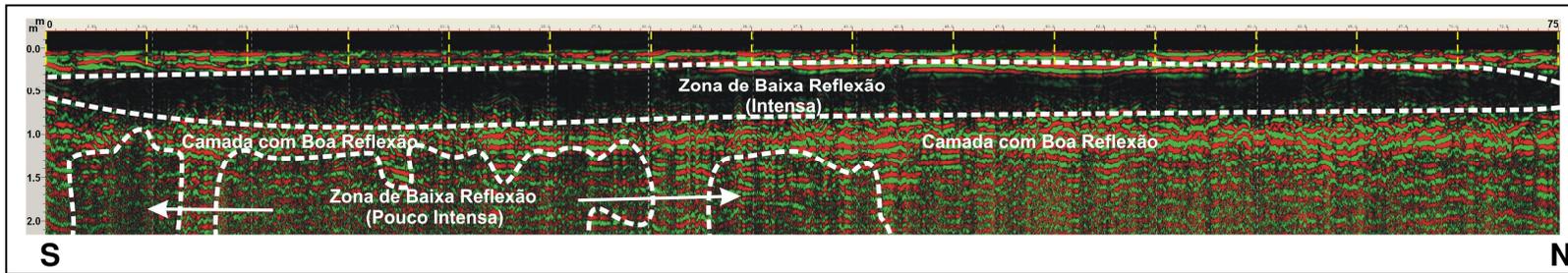


Figura 9.6 – Radargrama do perfil 7 onde observa-se uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por todo perfil, seguida por uma camada com boa reflexão e por bolsões de zonas de baixa reflexão.

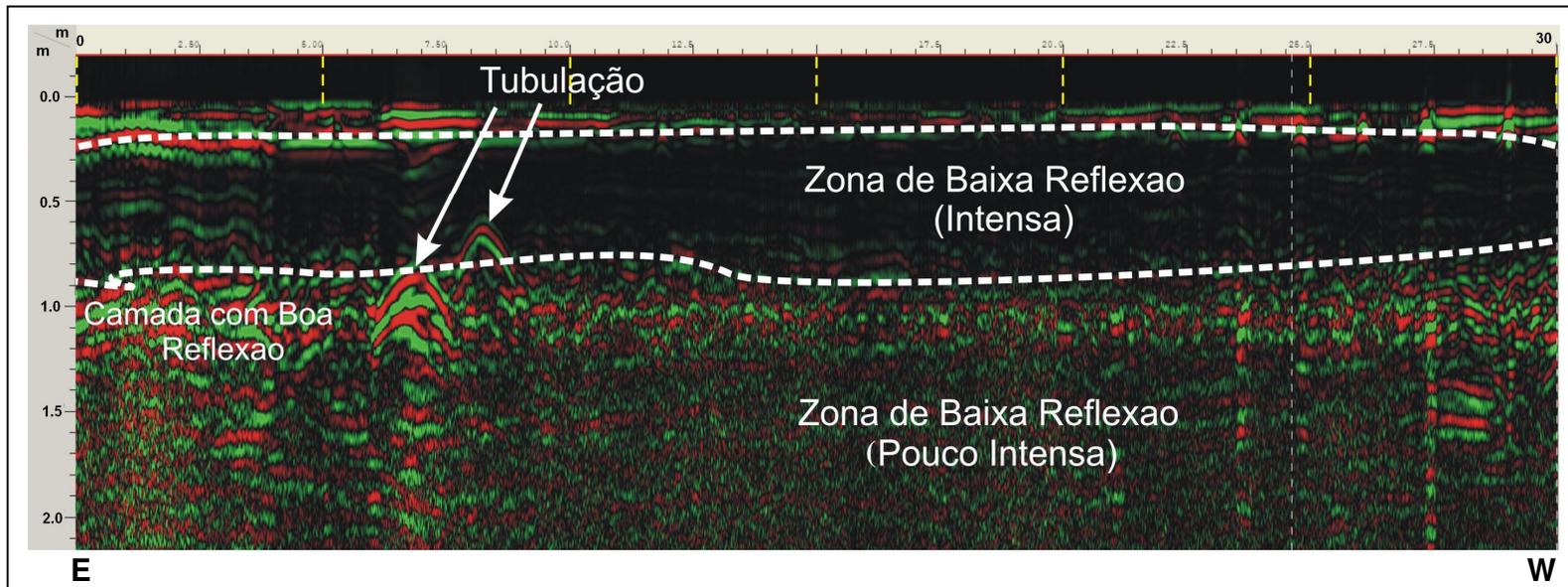


Figura 9.7– Radargrama do perfil 8 mostrando a presença de uma zona baixa reflexão intensa que se estende por todo perfil.

Observam-se no perfil algumas tubulações e os refletores dos tanques de ferro com o topo a aproximadamente 0,8 m de profundidade (formas hiperbólicas).

Zonas de baixa reflexão sob a forma de bolsões são também observadas nas áreas adjacentes aos tanques nas profundidades entre 1 e 2 m. Provavelmente as áreas de baixa reflexão observadas no perfil representam a contaminação causada pelo combustível gasolina.

O perfil 11 está representado na Figura 9.10. Ele inicia na rua Lauro Sodré e termina dentro no posto, próximo aos tanques de diesel (Figura 9.5). O perfil tem 20 m de comprimento.

O perfil mostra ao longo de todo seu comprimento uma zona de baixa reflexão intensa que se sobrepõe a uma camada com boa reflexão, que ocorre a aproximadamente 1 m de profundidade. Entre as profundidades 1 e 2,2 m ocorrem zonas de baixa reflexão sob a forma de bolsões.

O perfil 12, representado na figura 9.11, inicia na rua Lauro Sodré, é paralelo à rua Dom Pedro II e tem 20 m de comprimento. Esse perfil foi feito entre os tanques de diesel e de gasolina comum, porém está localizado mais próximo aos tanques de diesel (Figura 9.5).

Após a camada com boa reflexão à profundidades inferiores a 1 m observa-se novamente uma zona de baixa reflexão porém pouco intensa. Algumas formas hiperbólicas nos registros mostram a localização de tubulações subterrâneas.

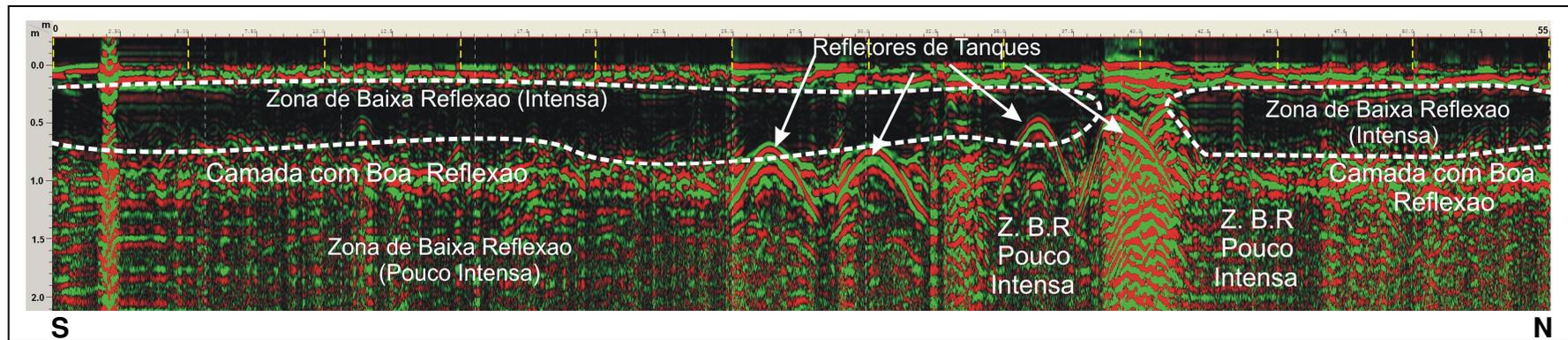


Figura 9.8 – Perfil 9 realizado no posto Central, mostrando zonas de baixa reflexão próximas aos refletores dos tanques.

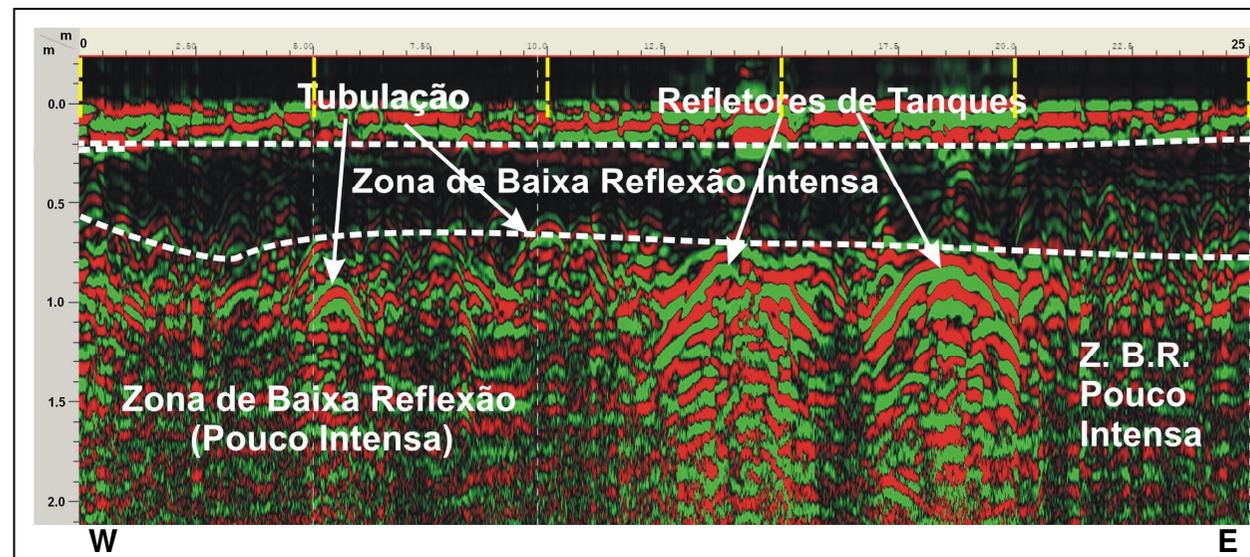


Figura 9.9 – Perfil 10 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão bem próximas aos refletores dos tanques.

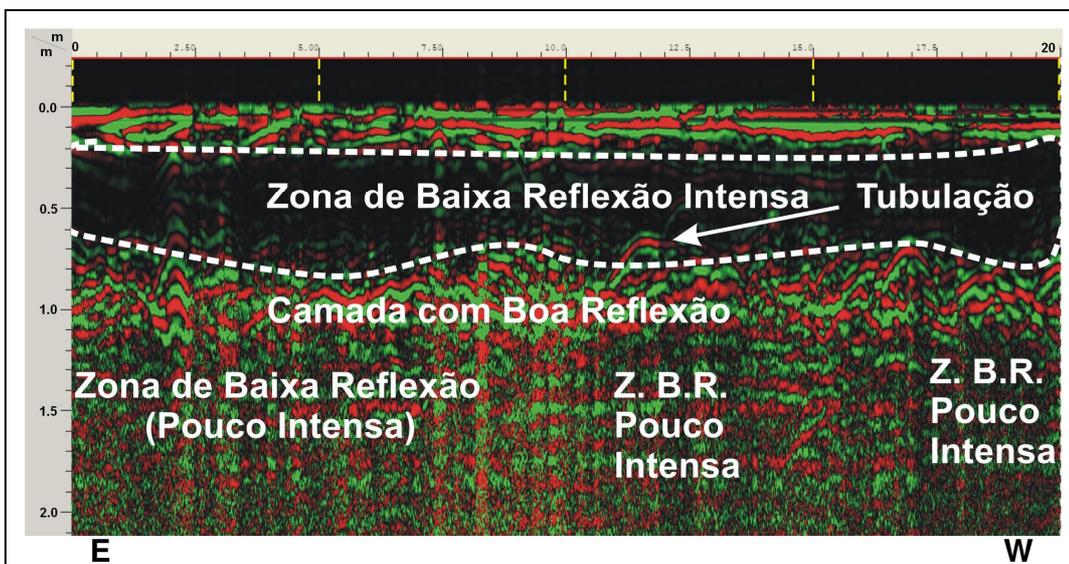


Figura 9.10 – Perfil 11 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a variação vertical da camadas e a presença de zonas de baixa reflexão.



Figura 9.11 – Perfil 12 realizado no posto Central em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão.

- ***Correlação dos Dados de Fluxo Subterrâneo com os dados de GPR para o Posto Central***

Foi feita a correlação dos resultados apresentados pelos perfis GPR com os resultados do mapa de fluxo subterrâneo construído para área (Figura 8.10). Assim no local onde se localiza o posto Central, o sentido do fluxo subterrâneo indica movimentação para norte passando à direção NW. Esse fator indica que se houver contaminação por parte dos tanques de diesel e de gasolina o fluxo subterrâneo movimentaria essa contaminação para esse setor. Portanto os perfis feitos nessa direção teriam maiores chances de apresentar contaminação.

Portanto os bolsões e zonas de baixa reflexão observadas, preferencialmente, nos radargramas dos perfis 9, 10, 11 e 12, podem ser provenientes de vazamentos dos tanques de gasolina e óleo diesel, o que propicia a contaminação por esses derivados de petróleo.

Analisando o perfil 9 (Figura 9.8), observa-se perfeitamente uma variação vertical das camadas em subsuperfície. A camada de boa reflexão sofre modificações por interferência de zonas de baixa reflexão. Além disso, a presença dessas zonas são observadas nos arredores dos tanques de combustíveis e se prolongam a profundidades inferiores.

Essas zonas podem ter sido formadas devido a vazamentos nos tanques de diesel, já que o perfil foi executado bem próximo aos tanques desse combustível.

O comportamento do fluxo subterrâneo e o contexto geral da localização desse perfil reforçam essa idéia.

Assim, considerando ainda que a vida útil de um tanque de combustível é de 20 anos e que depois disso os tanques de armazenamento de combustíveis estão sujeitos à corrosão, pode-se dizer que o posto está possivelmente contaminado.

- ***Análise dos perfis executados no Posto Carvalho I***

O posto Carvalho I está localizado na rua Justo Chermont, às margens do rio Maratauíra. Neste posto, foram realizados 5 perfis GPR com comprimentos variando de 20 a 65m. A Figura 9.12 mostra a planta esquemática do posto, com a localização das seções GPR.

O perfil 17, representado na Figura 9.13 apresenta 50 m de comprimento e foi executado paralelamente a rua Tiradentes, fora do posto de serviço (Figura 9.12).

Próximo à superfície, é possível observar o piso de concreto que é caracterizado por uma alta reflexão, em seguida ocorre uma zona de baixa reflexão que alcança 0,7 m de profundidade e que se estende continuamente por toda extensão do perfil. Abaixo dessa zona ocorre uma camada de boa reflexão que também é contínua.

O perfil 18, representado na Figura 9.14, foi feito transversal às ruas Tiradentes e Justo Chermont (Figura 9.12). O perfil apresenta 65 m de comprimento; nele observa-se a reflexão do piso de concreto que ocorre com uma alta reflexão na região mais próxima à superfície, seguido por uma zona de baixa reflexão que alcança 0,9 m de profundidade e que se estende por quase toda extensão do perfil. Abaixo dessa zona ocorre uma camada de boa reflexão que também é contínua, porém que parece sofrer influências por algum tipo de material condutivo que aparece sob a forma de zonas de baixa reflexão, isso ocorre a partir de 1m de profundidade.

Formas hiperbólicas evidenciadas no perfil são provavelmente causadas por tubulações.

O perfil 19, representado na Figura 9.15, apresenta 50 m de comprimento e foi feito paralelamente a rua Justo Chermont, fora do posto (Figura 9.12).

O perfil foi executado na área que fica entre o posto e o rio, nele é possível observar o piso de concreto próximo à superfície, seguido por uma zona de baixa reflexão pouco espessa, que se estende continuamente por toda extensão do perfil. Abaixo dessa zona ocorre o domínio da camada de boa reflexão, o mesmo que ocorre no perfil 17.

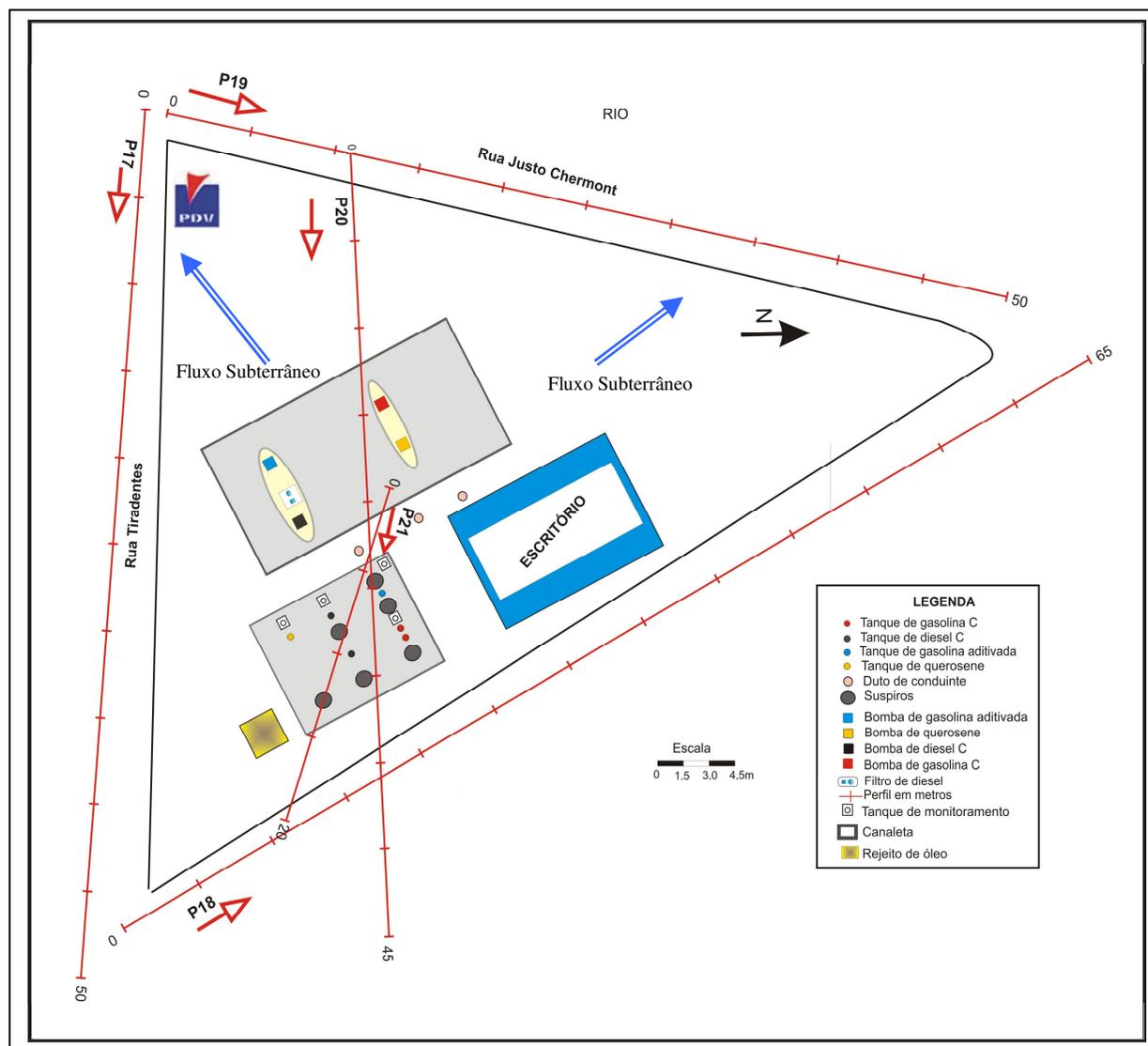


Figura 9.12 – Planta esquemática do posto Carvalho I mostrando a localização dos perfis GPR realizados. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.



Figura 9.13– Perfil 17 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando a variação vertical da camadas e a presença de bolsões de baixa reflexão.

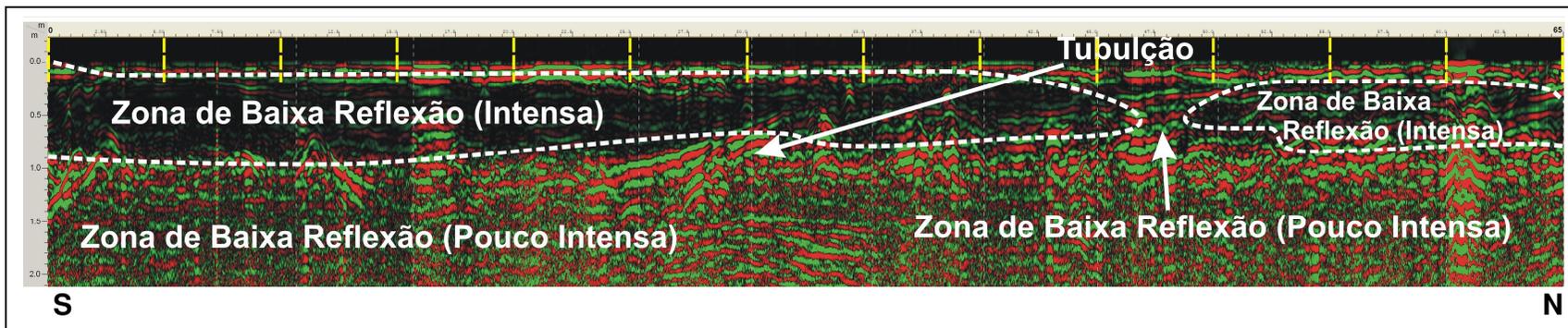


Figura 9.14 – Perfil 18 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando a presença de zonas de baixa reflexão no domínio na camada de boa reflexão.

Observam-se ainda nesse perfil a presença de formas hiperbólicas que indicam a presença de tubulações.

O perfil 20, representado na Figura 9.16, está localizado no interior do posto, em meio aos tanques e bombas de diesel e gasolina. Esse perfil tem 45 m de comprimento.

Observa-se no perfil que, logo abaixo do piso de concreto que ocorre com uma alta reflexão bem próximo à superfície, ocorre a presença de zonas de baixa reflexão intensa sob a forma de bolsões. Essas zonas apresentam-se nos arredores dos tanques de gasolina e de diesel. Bolsões de baixa reflexão podem ser observados no radargrama a partir de 1 m de profundidade.

As formas hiperbólicas indicam a presença dos tanques subterrâneos e têm seu topo a 0,6m de profundidade. Elas ocorrem em meio a uma camada com boa reflexão.

O perfil 21, representado na Figura 9.17, tem 20m de comprimento e foi feito no interior do posto, cruzando a área dos tanques de combustíveis (Figura 9.12).

O perfil apresenta zonas de baixa reflexão na forma de bolsões a poucos centímetros da superfície, essas zonas encontram-se nos arredores dos tanques o que pode indicar contaminação ou simplesmente a presença de argila úmida. Abaixo desses bolsões observam-se os refletores dos tanques de combustíveis, os quais parecem estar no domínio de uma camada com boa reflexão, porém essa camada em algumas porções apresenta zonas de baixa reflexão.

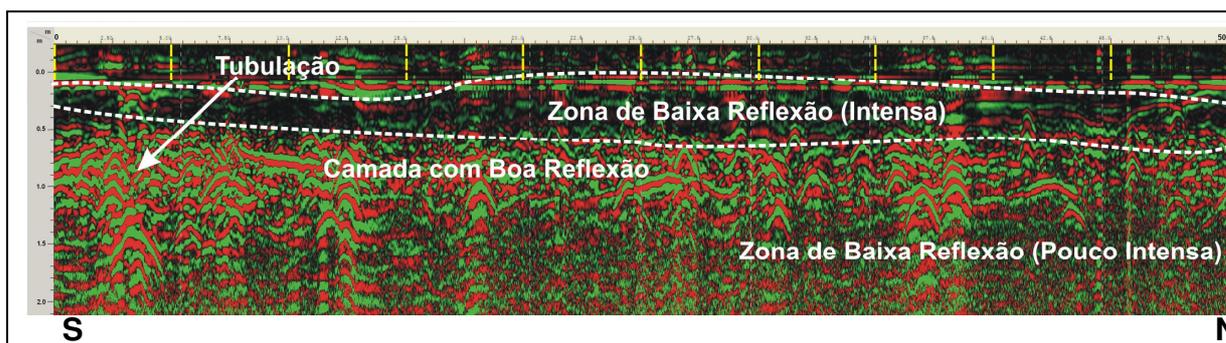


Figura 9.15– Perfil 19 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando zonas de baixa reflexão.

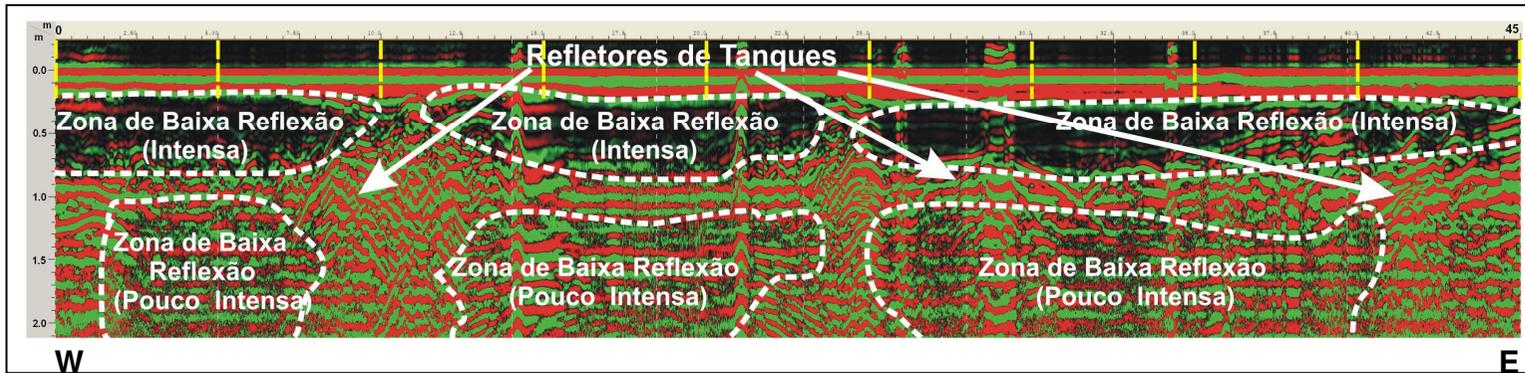


Figura 9.16– Perfil 20 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando zonas de baixa reflexão na forma de bolsões ocorrendo ao redor dos tanques.

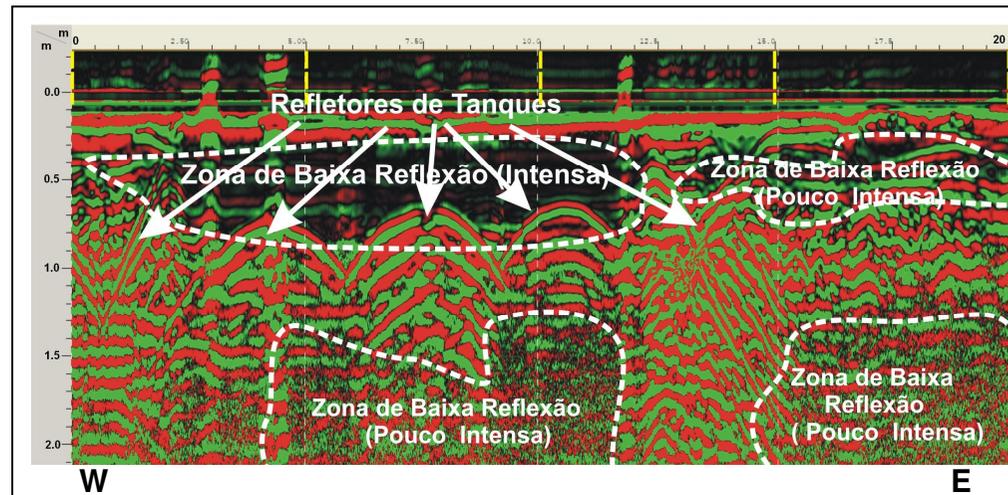


Figura 9.17– Perfil 21 realizado no posto Carvalho I em Abaetetuba, mostrando bolsões de baixa reflexão ocorrendo ao redor dos tanques.

- ***Correlação dos Dados de Fluxo Subterrâneo com os dados de GPR para o Posto Carvalho I***

Os perfis de GPR levantados no posto Carvalho I mostraram zonas abundantes. Observaram-se, também, zonas de baixa reflexão na parte superior dos perfis e somente em alguns deles essa zona apareceu na forma de bolsões ocorrendo tanto próximo da superfície como em profundidades maiores em meio à camada de boa reflexão.

Os perfis 17 e 18 mostram as zonas em que a onda de GPR recebeu máxima atenuação e por maior extensão, sugerindo uma contaminação dirigindo-se para o local desses perfis a partir do posto.

Analisando a situação do posto Carvalho I no contexto do comportamento do fluxo subterrâneo no posto, percebe-se que está localizado próximo a uma área de recarga de aquíferos. Desse modo, o posto foi classificado como possivelmente contaminado. Além disso, contribuíram o tempo de funcionamento dos tanques e por ele apresentar histórico de vazamento de combustível ocasionado pela corrosão de tanques.

9.3.2 Postos Suspeitos de Contaminação

Dentre os postos de serviços analisados neste trabalho, três foram classificados como suspeitos de contaminação por apresentarem em seus perfis de GPR zonas de baixa reflexão. Os postos assim classificados foram: o Posto São Paulo, Carvalho III e Carvalho II. A análise dos dados de GPR coletados nesses postos encontra-se descrita a seguir.

- ***Análise dos perfis executados no Posto São Paulo***

O posto São Paulo está localizado em uma das principais vias urbanas do município, neste posto, foram realizados 5 perfis GPR, com comprimentos variando de 15 a 50 m (Tabela 9.3). A Figura 9.18 mostra a planta esquemática do posto, com a localização das seções GPR adquiridas.

O perfil 1 representado na Figura 9.19, apresenta 30 m de comprimento. Esse perfil foi realizado paralelamente a avenida João Miranda, fora do posto (Figura 9.18).

O perfil apresentou nas profundidades entre 0,2 e 0,6 m, uma zona de baixa reflexão pouco espessa, que é observada em quase todo o perfil. Essa zona é seguida por uma camada de boa reflexão que começa a ocorrer em torno de 0,7 m de profundidade e que domina o radargrama.

Foram observadas no perfil formas hiperbólicas indicando a presença de tubulações que, provavelmente, são tubos de abastecimento de água e encanações.

O perfil 3, representado na Figura 9.20, tem 50 m de extensão e foi realizado paralelamente à avenida São Paulo, fora das dependências do posto (Figura 9.18).

Observa-se que na porção mais superior desse perfil, entre 0,2 e 0,8 m de profundidade, ocorrem zonas de baixa reflexão intensa que se encontram na forma de bolsões e, também sob a forma de uma zona extensa e contínua lateralmente. Percebe-se também a existência de uma camada com boa reflexão logo abaixo na zona de baixa reflexão descrita. Essa camada é contínua lateralmente entre as profundidades de 1 a 1,5 m, após é possível observar bolsões de zonas de baixa reflexão (pouco intensa). Os bolsões de baixa reflexão observados a partir de 1,5 m de profundidade respectivamente, podem estar representando algum tipo de influência ou contaminação, ou camada condutiva. Formas hiperbólicas indicando tubulação são observadas no radargrama.

O perfil 4, representado na Figura 9.21, tem 40 metros de comprimento e foi feito dentro do posto, em uma área próxima aos tanques de diesel, paralelo à avenida São Paulo (Figura 9.18). Observa-se na parte mais superior do perfil, entre 0,2 e 0,9 m de profundidade, uma zona de baixa reflexão contínua e bastante extensa que se estende por todo comprimento do perfil analisado.

No perfil 4 é possível observar refletores de tanque com amplitude forte, na forma de hipérboles, que se destacam em meio a zona de baixa reflexão que domina o radargrama. Observa-se no perfil, a localização dos tanques de diesel subterrâneo, que têm seu topo a 0,8 m de profundidade.

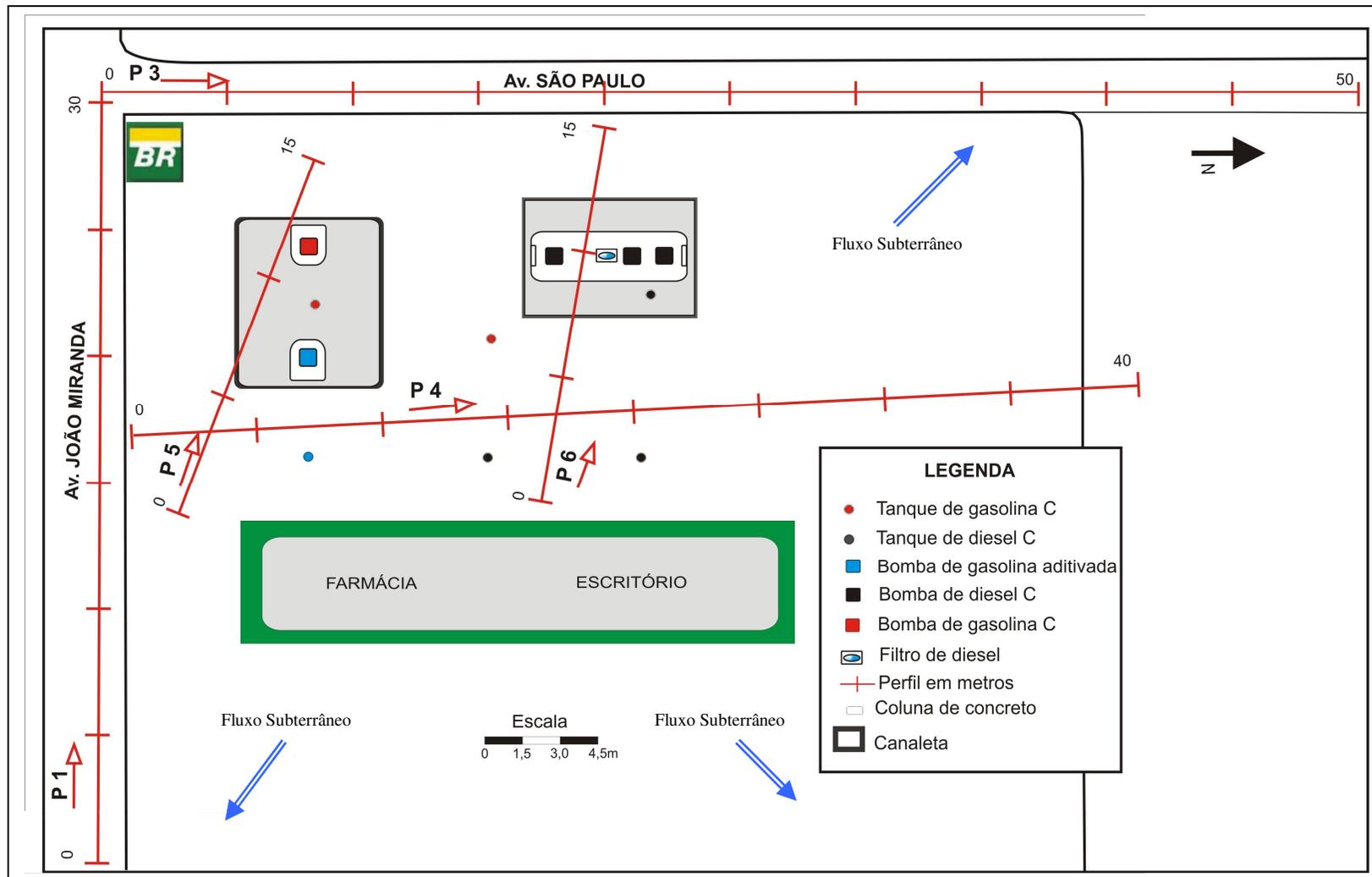


Figura 9.18 – Planta esquemática do posto São Paulo com a localização dos perfis GPR. As setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.

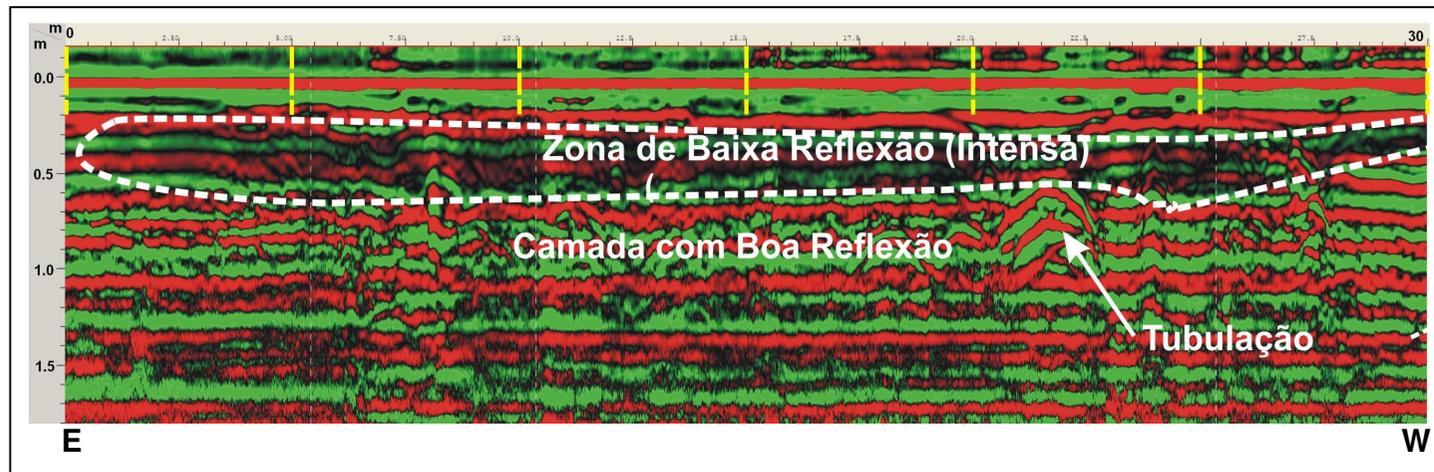


Figura 9.19 – Perfil 1 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio da camada de boa reflexão.

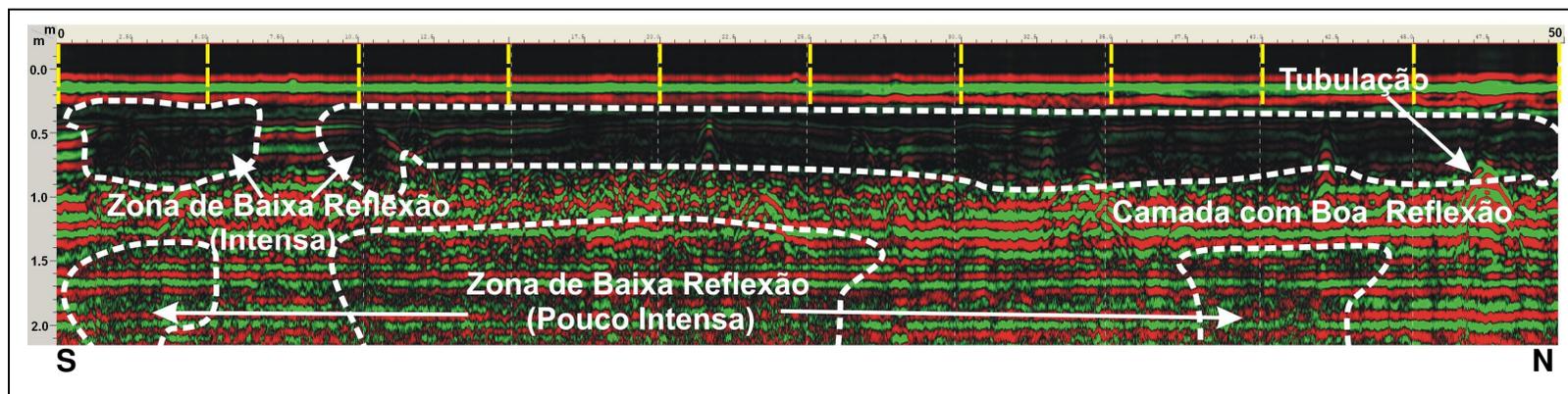


Figura 9.20 – Perfil 3 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando os bolsões se zonas características de contaminação por derivados de petróleo.

Os refletores formam um contraste lateral em subsuperfície com uma zona extensa de baixa reflexão, onde ocorre uma acentuada perda do sinal eletromagnético. A presença de zonas de baixa reflexão nos arredores dos tanques de diesel se prolongam a profundidades maiores. Observa-se também que nas proximidades dos tanques essa zona ainda é mais acentuada.

O perfil 5, representado na Figura 9.22, apresenta 15 m de comprimento e foi executado dentro do posto, próximo às áreas dos tanques de gasolina (Figura, 9.18).

O perfil mostra uma zona onde ocorre a total perda de sinal, que se estende por todo perfil entre as profundidades de 0,3 e 0,9 m, contrastando lateralmente apenas com os refletores de tanques, que ocorrem sob a forma de hipérbolos.

Zonas de baixa reflexão intensa dominam o perfil, porém observa-se que entre os refletores de tanque essa zona encontra-se menos intensa. Provavelmente as áreas de baixa reflexão observadas no perfil representam a contaminação causada pelo combustível gasolina.

O perfil 6, representado na Figura 9.23, apresenta 15 m de extensão e foi realizado paralelamente à avenida João Miranda, às proximidades dos tanques de gasolina, nas dependências do posto (Figura 9.18).

Percebe-se que entre as profundidades 0,3 e 0,7 m ocorrem zonas de baixa reflexão intensa que se encontram na forma de bolsões e, também sob a forma de uma zona extensa e contínua lateralmente, o mesmo que ocorre com o perfil 3. Percebe-se também a presença de uma camada com boa reflexão logo abaixo na zona de baixa reflexão descrita acima, essa camada encontra-se “apagada” em quase todos os perfis analisados nesse posto, ela ocorre entre 0,5 e 1 m de profundidade, após isso sofre interferência de zonas de baixa reflexão (pouco intensa).

Uma forma hiperbólica mostra a localização exata do tanque de gasolina, que aparece na porção esquerda do radargrama, observa-se que ao lado desse tanque aparecem os bolsões que ocorrem na parte mais superior do radargrama, podendo assim ser um indício de que a contaminação está migrando para regiões mais superiores ao tanque, além da suspeita de estar infiltrando para áreas mais profundas.

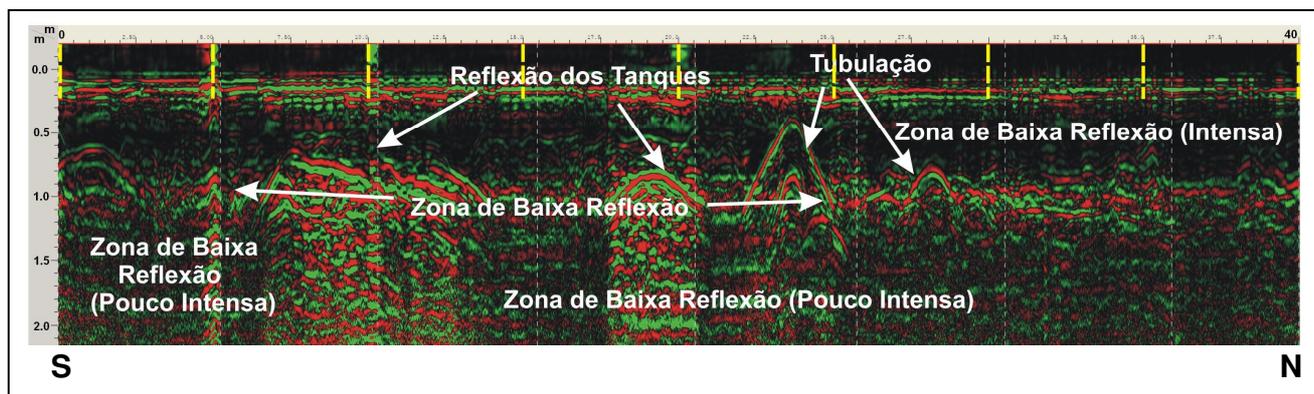


Figura 9.21 – Perfil 4 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio das zonas de baixa reflexão.

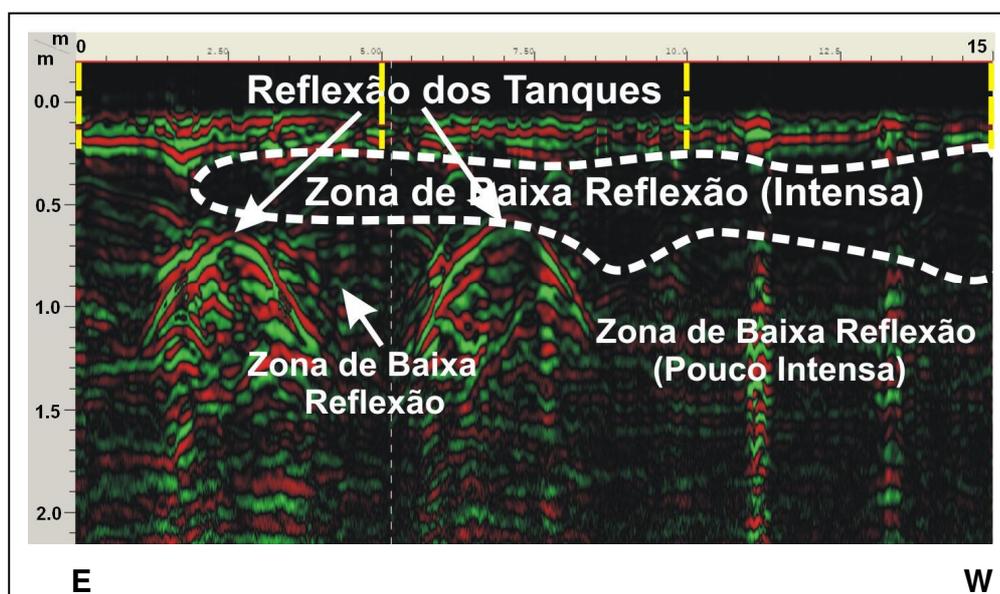


Figura 9.22 – Perfil 5 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando o domínio das zonas de baixa reflexão próximo aos refletores de tanques de gasolina.

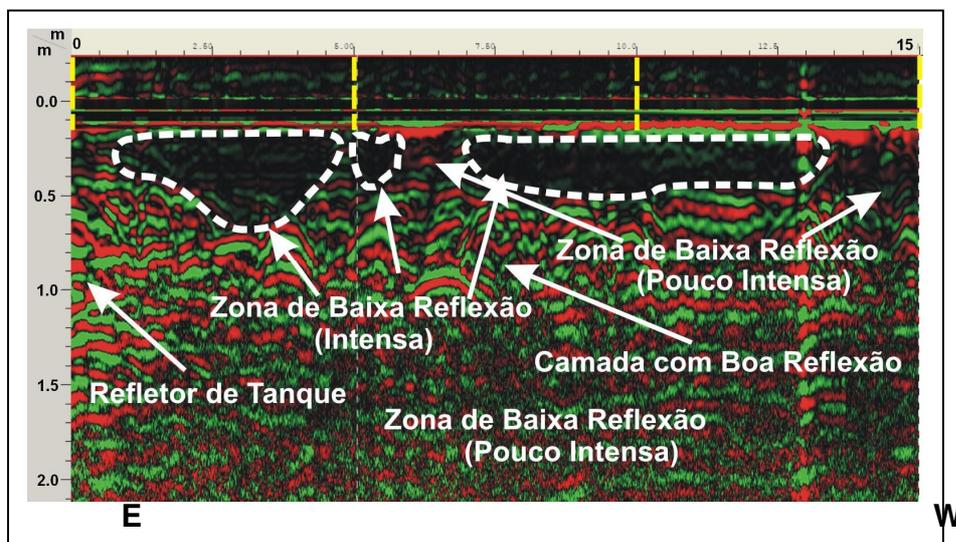


Figura 9.23 – Perfil 6 realizado no posto São Paulo, Abaetetuba, mostrando bolsões de zonas de baixa reflexão próximo aos refletores de tanques de gasolina.

- ***Correlação dos Dados de Fluxo Subterrâneo com os dados de GPR para o Posto São Paulo***

Os perfis GPR realizados no posto São Paulo apresentam características semelhantes as do posto Central. Pode-se, por exemplo, observar zonas de baixa reflexão em todos os perfis, variando de zonas extensas passando à forma de bolsões, que podem ser observados até bem próximo à superfície. Também foram observadas no perfil camadas de boa reflexão, refletores de tanques e algumas tubulações.

Os resultados do levantamento GPR realizado no posto São Paulo foram correlacionados com os resultados do mapa de fluxo subterrâneo construído para área (Figura 8.5). Assim, verificou-se que o posto encontra-se em uma área de recarga de aquíferos, que propicia um espalhamento natural de contaminação a partir dele.

Classificou-se o posto São Paulo como suspeito de contaminação, considerando às condições físicas observadas no posto, a falta de seguimento dos padrões de segurança ambiental proposto pelos órgãos competentes, ao fato de estar localizado em uma área de recarga de aquíferos e aos resultados da interpretação dos dados GPR adquiridos. Os resultados do levantamento GPR realizados no posto, é o fator de

maior relevância a essa classificação, pois os perfis construídos para esse posto apresentam zonas de baixa reflexão.

- ***Análise dos perfis executados no Posto Carvalho III***

O posto Carvalho III está localizado na avenida D. Pedro II. Nele, foram realizados 5 perfis GPR, com comprimentos variando de 40 a 50m (Tabela 9.3). A Figura 9.24 mostra a planta esquemática do posto, com a localização das seções GPR.

O perfil 22, representado na Figura 9.25, tem 45m de comprimento e foi feito fora das dependências do posto, paralelamente a rua José Latino Lídio da Silva (Figura 9.24). O perfil apresenta uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por toda sua extensão, entre as profundidades de 0,1 e 0,7 m. Essa zona é seguida por uma camada de boa reflexão que começa a ocorrer em torno de 0,6m de profundidade.

O perfil 23, representado na Figura 9.26, apresenta 50 m de extensão e foi realizado paralelamente à Rodovia Dr. João Miranda (Figura 9.24). Nas profundidades entre 0,2 e 1,0 m ocorrem zonas de baixa reflexão intensa que se encontram na forma de bolsões. Esses bolsões ocorrem intercalados com uma camada de boa reflexão.

Os bolsões de baixa reflexão podem estar indicando a ocorrência de vazamentos nos tanques de combustíveis.

O perfil 24, representado na Figura 9.27, tem 40 m de comprimento e foi executado em um trecho paralelo a rua Dr. João Miranda, dentro do posto de serviço (Figura 9.24).

O perfil analisado mostra as canaletas de drenagem do posto, que aparecem no intervalo entre 25 e 30 m. Observa-se no radargrama uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por toda a extensão do perfil, ocorrendo entre 0,2 e 0,7 m de profundidade, porém alcança profundidades bem maiores em algumas regiões, estendendo-se verticalmente na forma de bolsões e contrastando com a camada de boa reflexão que se encontra dominando essa profundidade.

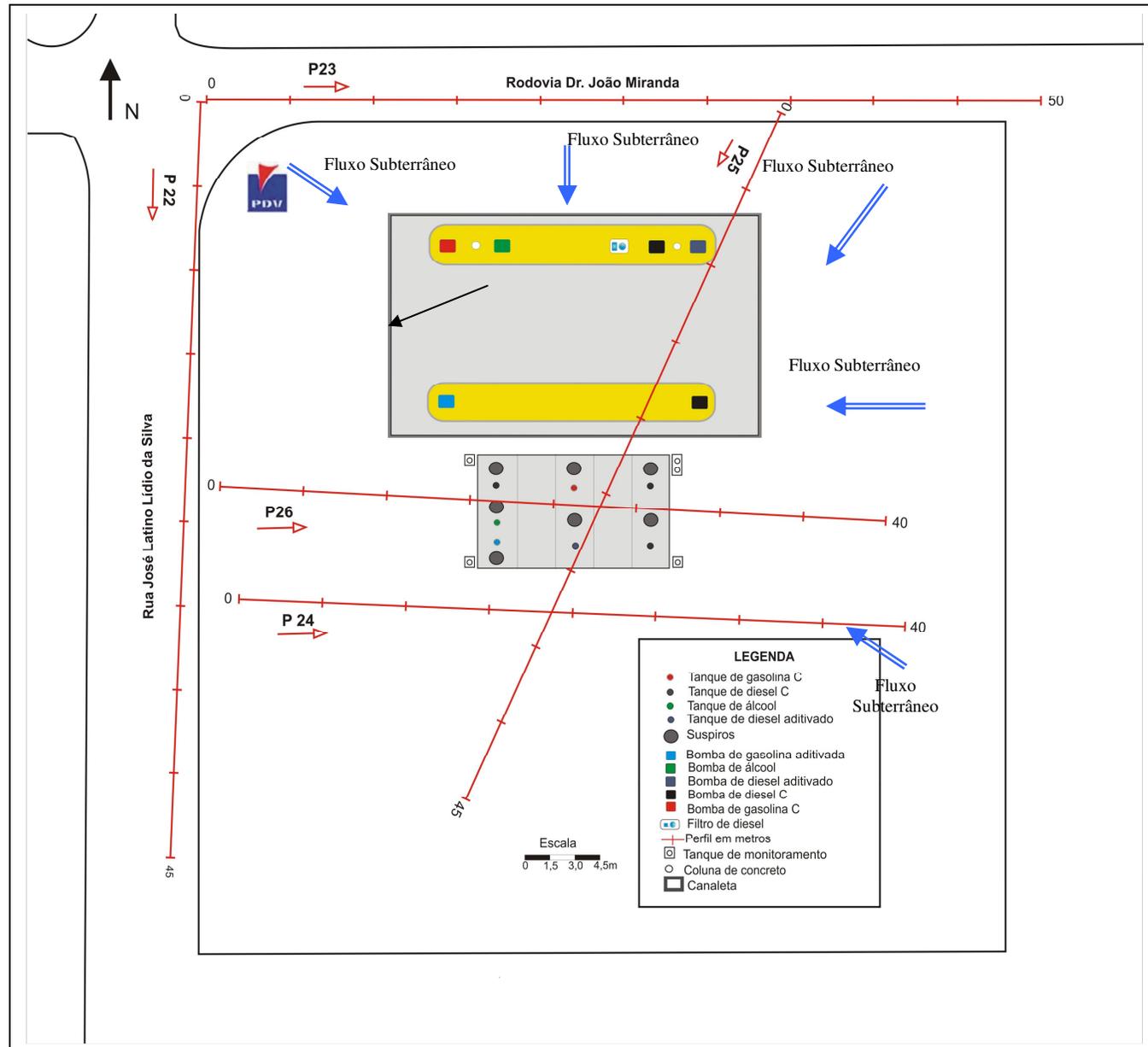


Figura 9.24 – Planta esquemática do posto Carvalho III com a localização dos perfis GPR.

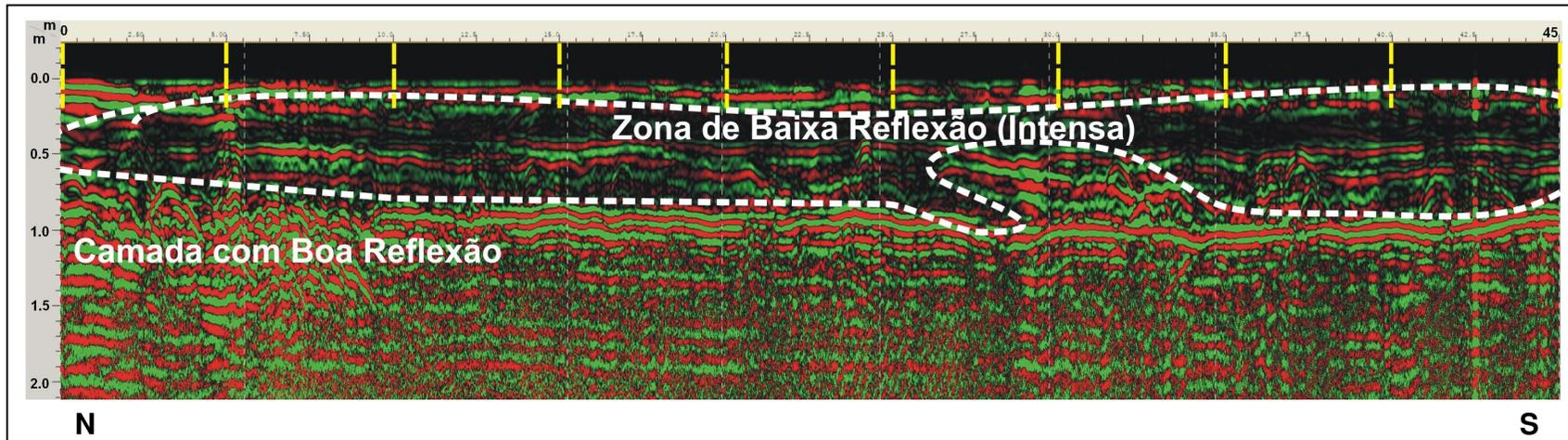


Figura 9.25 – Perfil 22 realizado no posto Carvalho III, mostrando uma zona de baixa reflexão provavelmente provocada por fatores naturais.

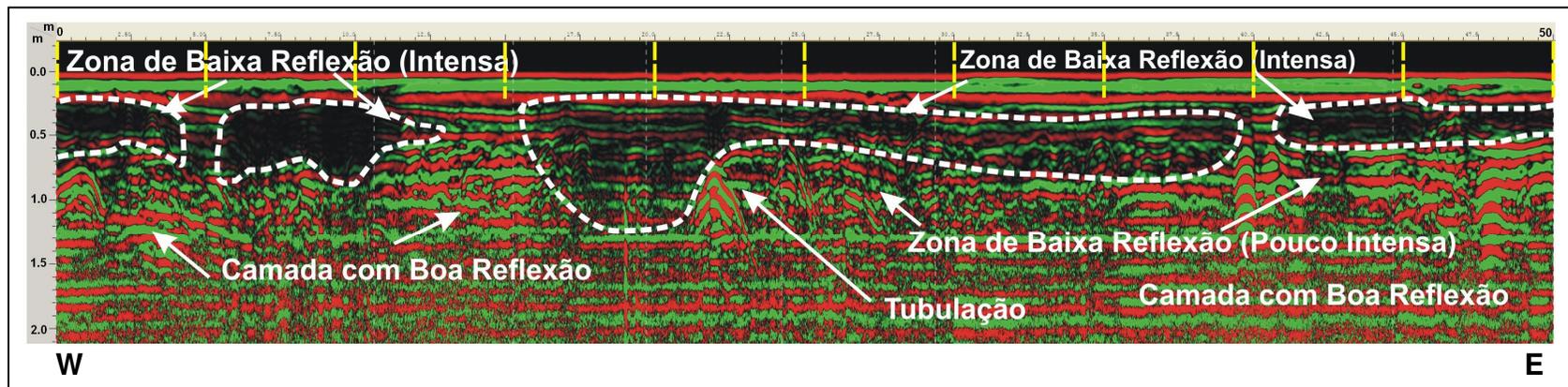


Figura 9.26 – Perfil 23 realizado no posto Carvalho III, mostrando zonas de baixa reflexão na forma de bolsões.

O perfil 25, representado na Figura 9.28, apresenta 45 m de comprimento e foi feito dentro do posto Carvalho III, paralelamente a rua José Latino Lídio da Silva (Figura 9.24). O perfil mostra uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por toda sua extensão, entre 0,2 e 0,9 m de profundidade. Seguindo a zona de baixa reflexão intensa, são observados possíveis refletores de tanques ou até mesmo uma camada de boa reflexão. Abaixo dessa área refletora ainda percebe-se zonas de baixa reflexão.

O perfil 26, representado na Figura 9.29, apresenta 40 m de comprimento. Esse perfil foi executado paralelamente a rua Dr. João Miranda, dentro do posto de serviço (Figura 9.24).

O perfil apresenta uma zona de baixa reflexão intensa que se estende por toda a extensão do perfil; essa zona ocorre entre 0,2 e 0,7 m de profundidade. Abaixo dessa zona pode ser observada uma outra zona de baixa reflexão, porém pouco intensa, que parece estar influenciando a camada de boa reflexão que ocorre nos perfis 22 e 23 a esta mesma profundidade.

Os topos de refletores de tanques de combustíveis, representados por formas hiperbólicas, encontram-se a aproximadamente 0,6 m de profundidade. Ao lado e abaixo dos refletores de tanques também se observam zonas de baixa reflexão intensa que causam as suspeitas de contaminação por parte do posto Carvalho III.

- ***Correlação dos Dados de Fluxo Subterrâneo com os dados de GPR para o Posto Carvalho III***

O posto Carvalho III é o posto mais novo da região de Abaetetuba, tendo apenas 4 anos de funcionamento. Assim, em termos de tempo de funcionamento esse posto não desperta suspeitas quanto à estar provocando contaminação. Porém de acordo com a análise dos dados obtidos através do levantamento GPR, existem zonas de baixa reflexão em alguns dos perfis levantados, o que permite suspeitar de contaminação.



Figura 9.27 – Perfil 24 realizado no posto Carvalho III, mostrando o contraste lateral entre a zona de baixa reflexão e camada de boa reflexão.

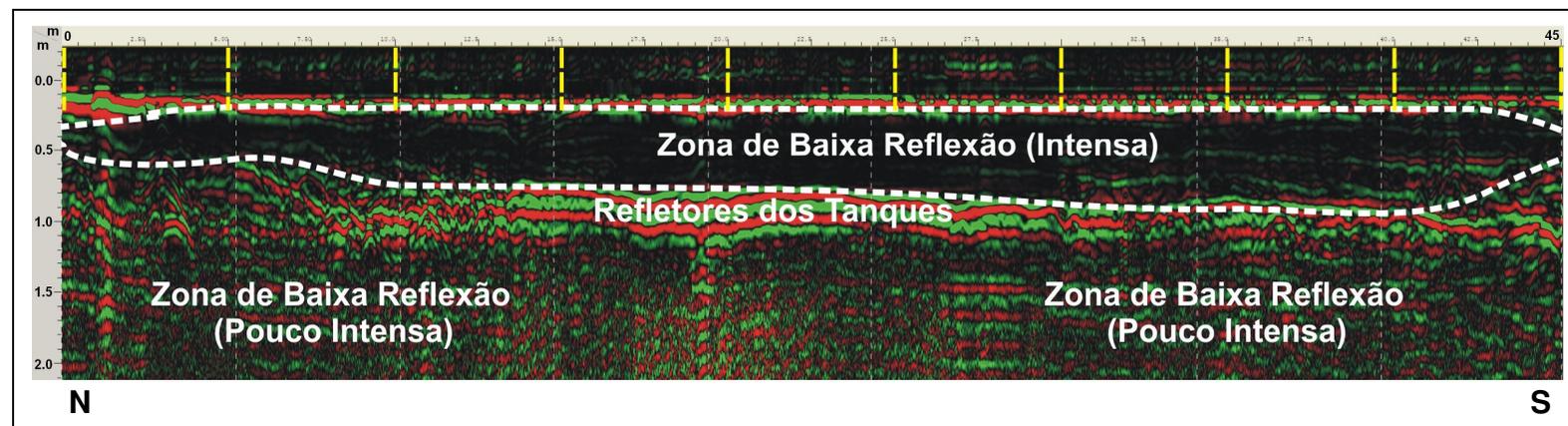


Figura 9.28 – Perfil 25 realizado no posto Carvalho III, mostrando os refletores de tanque em meio a zonas de baixa reflexão.

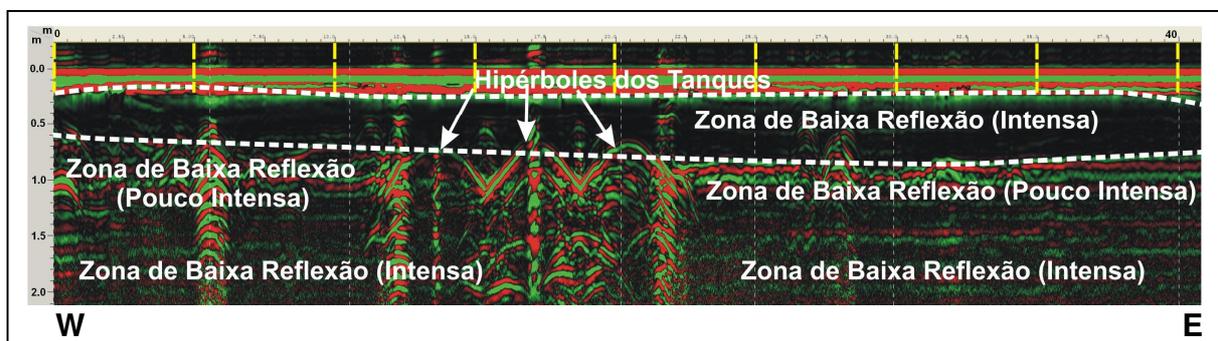


Figura 9.29 – Perfil 26 realizado no posto Carvalho III, mostrando zonas de baixa reflexão próximas aos refletores de tanques.

À partir da análise do dados de GPR levantados no posto Carvalho III, pode-se verificar em todos os perfis a presença de zonas de baixa reflexão que se estendem por todo comprimento do perfil. Bolsões de zonas de baixa reflexão também foram observados em alguns perfis.

Em termos de comportamento do fluxo subterrâneo o posto Carvalho III encontra-se bem próximo de uma área de recarga de aquífero. Assim, uma das possibilidades é que o contraste lateral entre a zona de baixa reflexão e a camada de boa reflexão apresentado no perfil seria um indício de contaminação por parte dos tanques de gasolina e diesel do posto, uma vez que bem próximo ao local onde foi executado o perfil, mais precisamente ao norte, estão localizados os tanques subterrâneos desses combustíveis (Figura 9.24). Como o posto situa-se em uma área de recarga de aquíferos, a suspeita dessa contaminação torna-se ainda maior.

- ***Análise dos perfis executados no Posto Carvalho II***

O posto Carvalho II, está localizado na rua Justo Chermont, às margens do rio Maratauíra. Neste posto, foram realizados 4 perfis GPR com comprimentos variando de 25 a 40 m (Tabela 9.3). A Figura 9.30 mostra a planta esquemática do posto, com a localização das seções GPR executadas no local.

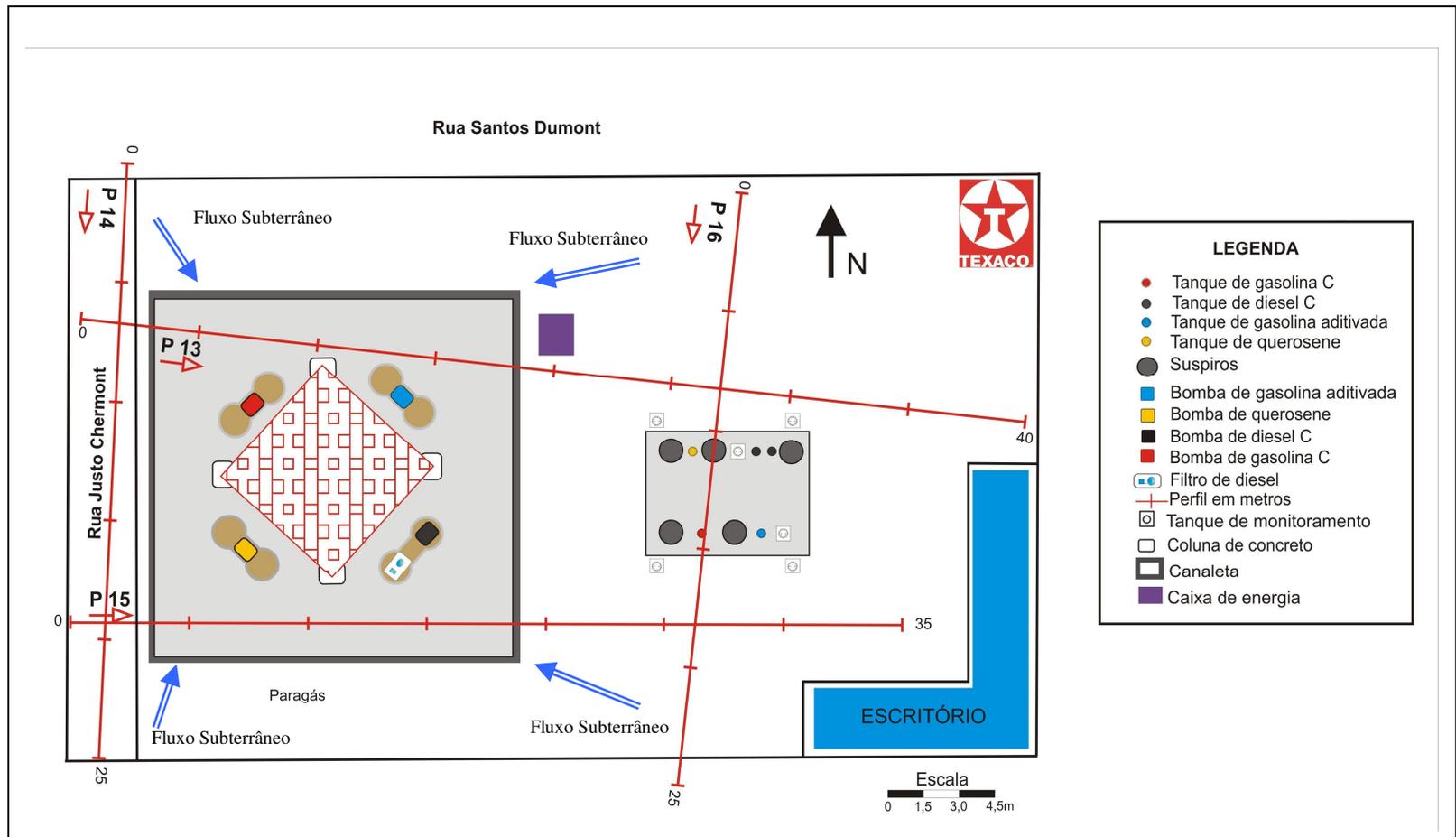


Figura 9.30 – Planta esquemática do posto Carvalho II, com a localização dos perfis GPR, onde as setas vermelhas indicam o sentido de execução dos perfis.

O perfil 13, representado na Figura 9.31, tem 40 m de comprimento e foi executado paralelamente à rua Santos Dumont, dentro do posto de serviço. Esse perfil foi feito em uma área próxima aos tanques de óleo diesel (Figura 9.30).

É possível observar no radargrama uma forma hiperbólica que seria referente a um dos tanques subterrâneos do posto. Essa hipérbole tem uma boa reflexão e contrasta com uma zona extensa de baixa reflexão que começa na parte superior do tanque. Em profundidades maiores ocorre uma camada com boa reflexão.

O perfil 14, representado na Figura 9.32, tem 25 m de comprimento e foi executado paralelamente a rua Justo Chermont, fora do posto de serviço (Figura 9.30).

O perfil 14 é muito semelhante ao perfil 13. Observa-se uma zona extensa de baixa reflexão na parte mais superior do perfil. Em profundidades maiores ocorre uma camada com boa reflexão. Podem, ainda, ser percebidas a presença de algumas tubulações no perfil analisado.

O perfil 15, representado na Figura 9.33, tem 35 m de extensão e foi executado paralelamente a rua Santos Dumont, dentro do posto de serviço (Figura 9.30). O perfil foi feito em uma área próximo às bombas de querosene e óleo diesel e paralela aos tanques de gasolina (comum e aditivada).

No perfil observa-se a presença do piso de concreto do posto seguido por uma zona de baixa reflexão intensa, que seria produzida por uma camada condutiva (argila úmida). Em profundidades superiores observa-se somente uma camada com boa reflexão.

O perfil 16, representado na Figura 9.34, tem 25 m de extensão e foi feito paralelamente a rua Justo Chermont, dentro do posto de serviço (Figura 9.30).

O perfil 16 foi executado na área dos tanques de gasolina e óleo diesel. Nele, é possível observar, além do piso de concreto, fortes reflexões causadas por formas hiperbólicas referentes à tubulações e tanques subterrâneos. Essas zonas contrastam com uma zona extensa de baixa reflexão que ocorre acima e ao redor desses tanques. Em profundidades maiores ocorre uma camada com boa reflexão que, provavelmente, reflete uma composição mais arenosa.

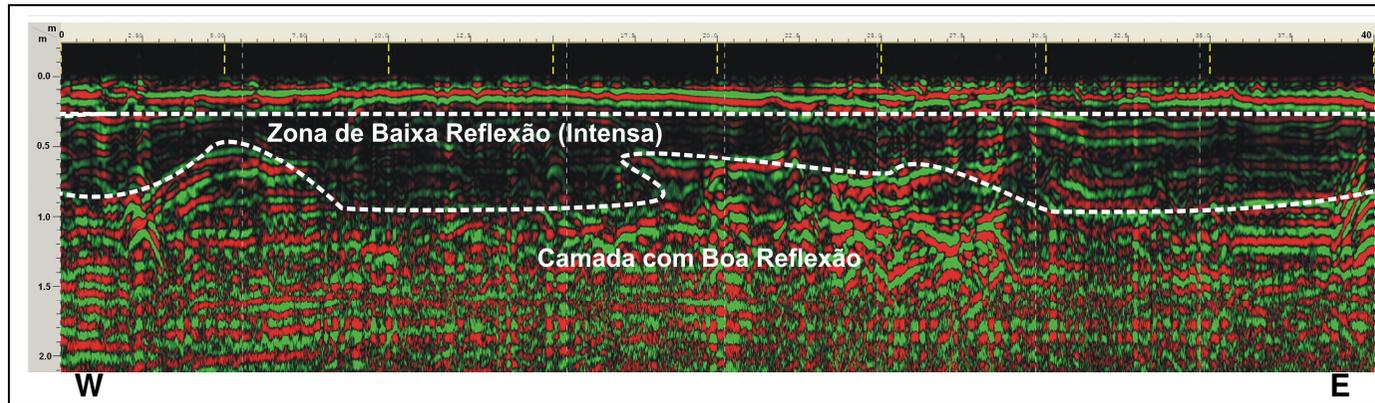


Figura 9.31 – Perfil 13 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.

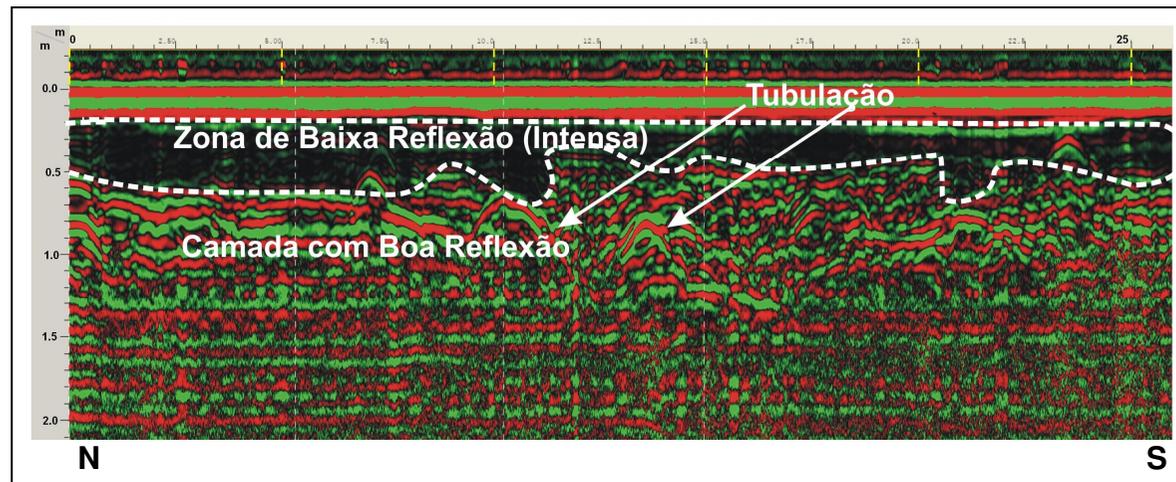


Figura 9.32 – Perfil 14 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.



Figura 9.33 – Perfil 15 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.

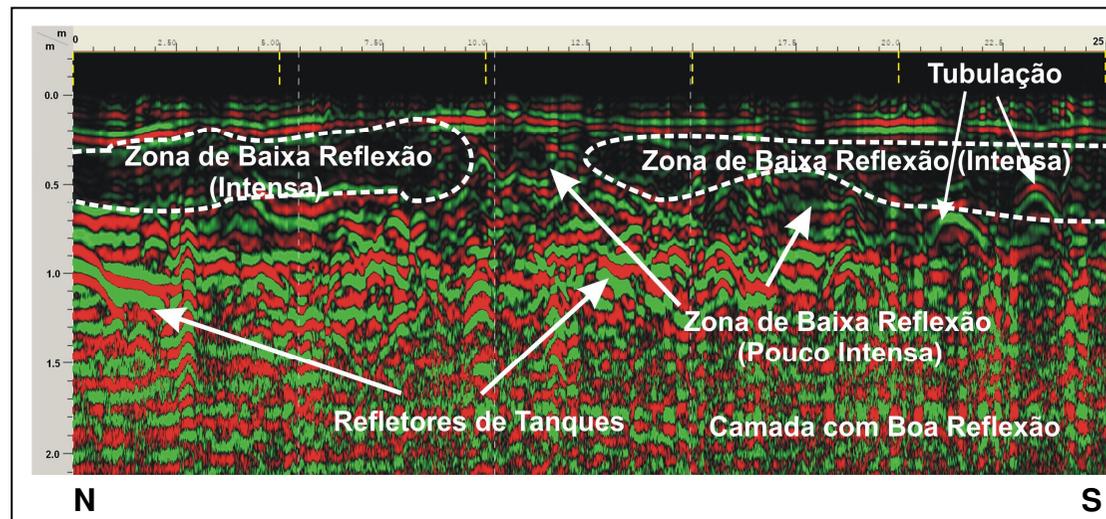


Figura 9.34 – Perfil 16 mostrando uma zona de baixa reflexão na parte superior do perfil, seguida uma camada de boa reflexão.

- ***Correlação dos Dados de Fluxo Subterrâneo com os dados de GPR para o Posto Carvalho II***

Os resultados do levantamento GPR mostraram que existem zonas de baixa reflexão em todos os perfis levantados na área do posto, o que reforça a suspeita de contaminação.

Em termos de comportamento do fluxo subterrâneo o posto Carvalho II está localizado em uma área de descarga de aquíferos, próximo a um rio. Assim se houver qualquer contaminação por parte de vazamento tanques de combustíveis, essa contaminação seguirá para o curso do rio, dispersando-a.

O posto Carvalho II tem 37 anos de funcionamento, depois que passaram a ser subterrâneos os tanques foram trocados de tanques de ferro para tanques intersticiais com parede dupla. Apesar dos tanques terem sido trocados, o posto não está isento de ter provocado ou de estar provocando contaminação no meio.

9.4 RESULTADOS FINAIS

A Tabela 9.4 sumariza a relação dos principais resultados finais atingidos neste estudo, tais como: idade, histórico de contaminação, resultados de GPR e de fluxo subterrâneo.

Tabela 9.4 – Tabela mostrando um resumo dos resultados finais do trabalho.

Postos	Idade do Posto	Histórico de Contaminação	Dados de GPR	Fluxo Subterrâneo	Classificação do Posto
Posto Carvalho I	Mais de 20 anos	Sim	ZBR intensas (contínua e na forma de bolsões)	Área de Recarga de Aqüíferos	Possivelmente Contaminado
Posto Carvalho II	Mais de 20 anos	Não Consta	ZBR intensas (contínua e na forma de bolsões)	Área de Descarga de Aqüíferos	Suspeito de Contaminação
Posto Central	Mais de 20 anos	Sim	ZBR intensas (contínua e na forma de bolsões)	Área de Recarga de Aqüíferos	Possivelmente Contaminado
Posto São Paulo	10 anos	Não Consta	ZBR intensas (contínua e na forma de bolsões)	Área de Recarga de Aqüíferos	Suspeito de Contaminação
Posto Carvalho III	3 anos	Não Consta	ZBR intensas (contínua e na forma de bolsões)	Área de Descarga de Aqüíferos	Suspeito de Contaminação

10 CONCLUSÃO

A aplicação da Geofísica através do método eletromagnético GPR nos postos de serviços da região urbana de Abaetetuba permitiu identificar zonas de baixa reflexão de sinal, que sugerem a presença de contaminação proveniente de vazamentos de tanques de combustível subterrâneos.

Os postos da área investigada foram classificados como Suspeitos de Contaminação (Posto São Paulo, Posto Carvalho II e Posto Carvalho III) e Possivelmente Contaminados (Posto Central e Posto Carvalho I), essa classificação foi feita a partir do histórico de contaminação e idade de atividade dos tanques, associado aos resultados apresentados pela interpretação dos perfis GPR e correlação com o fluxo subterrâneo.

Os postos Suspeitos de Contaminação apresentaram anomalias nos perfis, na forma de ausência de sinal, as quais foram chamadas de zonas de baixa reflexão, que são típicas de áreas contaminadas por hidrocarbonetos.

Os postos classificados como Possivelmente Contaminados também apresentam zonas de baixa reflexão, porém tinham mais de 20 anos de operação e histórico de vazamento de combustível ocasionado pela de corrosão de tanque.

O comportamento do mapa de fluxo construído para a área mostrou a presença de cinco áreas de descarga de aquíferos e três áreas principais de recarga de aquíferos. Os postos Carvalho II e Carvalho III encontram-se sobre áreas de descarga de aquífero, enquanto os postos Central, São Paulo e Carvalho I encontram-se sobre áreas de recarga de aquíferos.

Os postos Central, São Paulo e Carvalho I, por estarem localizados em áreas de recarga de aquíferos, devem ser alvo de maior controle, pois sua contaminação pode espalhar-se mais facilmente. Por outro lado, os postos Carvalho II e Carvalho III, por estarem localizados em áreas de descarga de aquíferos são menos susceptíveis à contaminação.

Assim, os postos possivelmente contaminados que perfazem 40% dos postos de abastecimento estudados na região, têm grande probabilidade de serem atualmente fontes reais de contaminação do lençol freático urbano.

Observa-se aqui, que o problema da contaminação por vazamentos de tanques em postos de serviços da região amazônica pode ser mais grave do que em outras regiões, uma vez que os tanques estão sujeitos a maior corrosão.

Assim, a partir do desfecho deste estudo sugere-se a locação de sondagens e poços de monitoramento em locais estratégicos, de acordo com a localização dos tanques de combustíveis potencialmente poluidores.

Os resultados aqui apresentados sugerem que a metodologia aplicada neste trabalho pode ser aplicada com sucesso em outras cidades da Região Amazônica.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. M. de. **Estudo dos recursos hídricos subterrâneos da região de Barcarena-Abaetetuba – Pará, Brasil como um fundamento para o zoneamento ecológico econômico do Baixo Tocantins**. 2005. 150f. Trabalho de Conclusão de Curso -TCC (Graduação) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, Belém, 2005.

ANNAN, A. P. **Use and techniques of GPR in near surface geophysics**. [S.l.]: Society of Exploration Geophysicists. Sensor & Software Inc. 110p. (Workshop Notes)

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO (ANP). **Postos de serviços revendedores**. Disponível em: <<http://www.anp.gov.com.br>> Acesso em 19 de abril de 2006.

ATEKWANA, E. A., SAUCK, W.A., WERKEMA JR., D. D. Investigations of geoelectrical signatures at a hydrocarbon contaminated site. **Journal of applied Geophysics**, v.44. n. 1-2, p.167-180. 1998.

AZAMBUJA, E., CANCELIER, D. B., NANNI, A. S. **Contaminação dos solos por LNAPL: discussão sobre diagnóstico e remediação**. 2002. Disponível em: <<http://www.azambuja.com.br/acervo/geosul2000.pdf>> Acesso em 23 de agosto de 2006.

BANDEIRA, I.C.N. **Características hidrogeológicas de barcarena-PA, como base para o planejamento urbano municipal**. 2006. 70f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, Belém, 2006.

BLACKMAN, JR. W. C. **Basic hazardous waste management**. 2nd ed. Boca Raton, FL, USA: Lewis Publishers, 1996. 397f.

BRASIL. MINISTERIO DA SAÚDE. Portaria nº518 de 25 de março de 2004. **Estabelece os procedimentos e responsabilidades relativos ao controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade, e dá outras providências**. 2004. 15p.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Departamento Nacional de Combustíveis. **Anuário estatístico**, 1995.

CAPUTO, M. V. **Geologia dopetróleo**. Belém: UFPA, 2005. 80f. (Notas de aula).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). **Manual de gerenciamento de áreas contaminadas**. São Paulo: CETESB, GTZ. 2. 2001. 389f.

COLE, G. M. **Assessment and remediation of petroleum contaminated sites**. Boca Raton, FL, USA: Lewis Publishers, 1994. 360p.

CONCAWE, S. **Protection of groundwater from oil pollution**. Boca Raton, FL, USA: Lewis Publishers, 1979. 160p.

COSTA, A. F. U.; AZAMBUJA, E.; NANNI, A. S. Métodos elétricos aplicados à detecção da contaminação do subsolo provocada por combustíveis: Sete casos estudados no Rio Grande do Sul, Brasil. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF THE BRAZILIAN GEOPHYSICAL SOCIETY, 6., 1999, Salvador. **Anais...** Salvador: SBF, 1999. 1CD-Rom.

DANIELS, J.J.; ROBERTS, R.; VENDL, M. A. Ground penetrating radar for the detection of liquid contaminants, **Journal of Applied Geophysics**, v.33, p 195-207. 1995.

DAVIS, J. L.; ANNAN, A. P. Ground penetrating radar for high-resolution mapping of soil and rock stratigraphy, **Geophysical Prospecting**, v.37, p. 531-551. 1989.

DEHAINI, J. **Detecção de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em subsuperfície pelo método de radar de penetração**. 2001. 100f. (Tese de Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências – USP, São Paulo, 2001.

DIETZ, D. N. Pollution of permeable strata by oil components: water pollution by oil. In: HEPPLER, P. **Water pollution by oil**. New York: Elsevier, Institute of Petroleum. 1970. 327 p.

DUARTE, O. O. **Dicionário enciclopédico inglês-português de geofísica e geologia**. São Paulo: SBF; 1997. 304p.(Ed. Preliminar)

ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). A Agência de Proteção Ambiental Norte Americana. **Relatório ambiental**. [S.l.:s.n.], 1996. 96p.

FETTER, C. W. **Contaminant hydrogeology**. EUA: MacMillan Publishing Company, 1993. 400p.

GEOPHYSICAL SURVEY SYSTEMS (GSSI). **SIR Systems - Operation Manual**, North Salem, NH, 2000. 91p.

GIBOTTI, M. J. **Subsídios geológico-geotécnicos para a implantação de tanques armazenagem subterrânea de combustíveis**: estudo de caso em um Formação Rio Claro (SP). 2000. 95p. Dissertação (Mestrado) – Universidade de Rio Claro, Rio Claro-SP, 2000.

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

HASAN, S. E. **Geology and hazardous waste management**. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 387p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Censo Demográfico**. Belém, 1996.

LUIZ, J. G. **Métodos eletromagnéticos**. Belém, 1998. 8p. (Notas de aula).

MANCINI, T. M. **Métodos de caracterização de áreas potencialmente contaminadas por hidrocarbonetos de petróleo**. 2002. 146f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 2002.

MATTA, M.A.S. **Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil**. 2002. 292f. – (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, 292p.

MERCER, J. W.; COHEN, R. M. View of immis fluids in the subsurface: properties, models, charaterization and remediation. **Journal of Contaminant Hydrogeology**, v. 6, p. 107-63. 1990.

OLIVEIRA, E. et al. Gasoline hydrocarbons groundwater pollution potential in metropolitan São Paulo In: INTERNATIONAL SEMINAR OF POLLUTION, PROTECTION AND CONTROL OF GROUND WATER, 1990, Porto Alegre. **Proceedings**. Porto Alegre: IAWPRC, ABAS, 1990. 18p.

OLIVEIRA, E. **Contaminação de aquíferos por hidrocarbonetos provenientes de vazamentos de tanques de armazenamento subterrâneo**. 1992. 112f. Dissertação (Mestrado) – USP, Instituto de Geociências, São Paulo, 1992.

PARÁ. Prefeitura de Abaetetuba. **Censo 2003**. Abaetetuba, 2003. 20p.

PARÁ. Prefeitura de Barcarena. **Censo 1999**. Barcarena, 1999.

PEDROSA, T. R. M. A. M. **Caracterização de plumas contaminantes de hidrocarbonetos em postos de abastecimento em Fortaleza, usando o método eletromagnético radar de penetração do solo (GPR)**. 2004. 135f. Dissertação (Mestrado em Geologia) - UFC, Centro de Ciências, Ceará, 2004.

REFINARIA GABRIEL PASSOS (REGAP). **Composição média da gasolina**. Disponível em: <<http://www.demec.ufmg.br>> Acesso em 25 de maio de 2006.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to applied and environmental geophysics**. New York: John Wiley & Sons Ltda., 1997. 796p.

SÁNCHEZ, L. E. A. **Desativação de empreendimentos industriais: um estudo sobre o passivo ambiental**. 1988. 178f. (Tese de Livre Docência) - Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, São Paulo, 1988.

SAUCK, W.A.; ATEKWANA, E.A.; NASH, M.S. High conductivities associated with a LNAPL plume imaged by integrated geophysical techniques. **Journal of Environmental and Engineering Geophysics**. v 2, n 3, p 203-212. 1998.

SAUCK, W. A. A model for the resistivity structure of LNAPL plumes and their environs in sandy sediments. **Journal of Applied Geophysics**, v. 44, n.1-2, p. 151-165. 2000.

SAUMA FILHO, M. **As águas subterrâneas de Belém e adjacências**: influência da Formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade. 1996. 128f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Centro de Geociências, 1996, Belém, 1996.

SCHWILLE, F. **Dense chlorinated solvents in porous and fractured media**: model experiments. Michigan: Chelsea, 1988. 688p.

PARÁ - Secretaria de Industria Comercio e Mineração do Pará (SEICOM). **Produção do mapa do município de Barcarena**. Barcarena-Pa: Programa de Informação Básica, 1999.

SILVA, J. A. F. **Áreas potencialmente impactadas por hidrocarbonetos de petróleo. caracterização, diagnóstico e proposições para saneamento ambiental**: estudo de caso. 2002. 58p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, São Paulo, 2002. (Exame de Qualificação)

TIBURTIUS, E. R. L., ZAMORA, P.P., LEAL E. S. **Contaminação de águas por BTXs e processos utilizados na remediação de sítios contaminados**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, Departamento de Química, 2004. 15p.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L.; ANNAN, A, P. Eletromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines, **Water Resources Research**, v.16, n.3, p. 574-582. 1980.

VAN DAM, J. **Migration of hydrocarbon in a water bearing stratum: joint problems of the oil and water industries**. London: Institute of Petroleum. 50p. 1967.

VON HIPPEL, A. R. **Dielectric materials and applications**. British Library, [s.n.], 1954. 438p.

YILMAZ, O. **Seismic data processing**. Tulsa, OK: Society of Exploration Geophysicists, 1987. v.2, 526p.