



**SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
CENTRO DE GEOCIÊNCIAS
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA E GEOQUÍMICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**ESTUDO HIDROGEOLÓGICO DA ÁREA LOCALIZADA
ENTRE O DEPÓSITO DE LIXO METROPOLITANO DE BELÉM
(AURÁ) E O LAGO ÁGUA PRETA**

Dissertação apresentada por:

VÂNIA EUNICE BAHIA

Orientador: **NORBERT FENZL**

BELÉM – PARÁ

2003

*À minha mãe **Cleonice Silva**, pelo incentivo oferecido por toda minha vida.*

*Ao meu noivo **Paulo Cleber** e a minha grande amiga **Irenice Silva**, pelo companheirismo e apoio em todos os momentos dos quais precisei.*

AGRADECIMENTOS

A conclusão do presente trabalho de pesquisa, somente foi possível, devido à colaboração das instituições e pessoas, que contribuíram de uma maneira muito especial, as quais passo a agradecer-las abaixo:

Ao meu orientador Prof. Dr. Norbert Fenzl, pelo seu apoio no decorrer dos trabalhos e principalmente pela confiança em mim depositada.

Ao CNPq, pelo financiamento do referido projeto através do Processo Nº 476923-1 / Edital Universal e pela concessão da bolsa de estudo, os quais permitiram a viabilização financeira do mesmo.

Agradecimentos exaustivos ao Prof. Dr. Gundisalvo P. Morales, pelo grande apoio e colaboração em todos os momentos, inclusive os mais difíceis do presente trabalho.

À equipe de Geofísica, nas pessoas do Prof. Dr. Gouvêa e do Sr. Afonso Quaresma que não mediram esforços para conclusão dos trabalhos de campo e dos estudos geofísicos.

A Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, que concedeu autorização para o desenvolvimento dos estudos na área pertencente à sua jurisdição.

Ao 8º Depósito de Suprimento e ao 2º Depósito de Suprimentos do Exército Brasileiro / Ministério da Defesa, nas pessoas do Ten. Cel. Waldson Sousa, Cabo Maurício, soldados Hunter, Francisco, Jonas e todos os demais que de alguma forma participaram e foram imprescindíveis em todas as atividades desenvolvidas e relacionadas à área do Exército.

A todos os meus colegas do Centro de Geociências, em especial ao Bruno Carneiro, Edgar Lima, Márcio Santos, Lilianne Maia, Alan Gomes, Natalina Tinoco, Francisco Ribeiro e Marcelo Moreno, pela amizade e colaboração incondicional durante o decorrer das atividades.

Ao Centro de Geociências, onde através de seu Diretor Prof. Dr. José Geraldo Alves, não mediu esforços para que o referido trabalho fosse desenvolvido, enfatizando os funcionários Sr. Carlos Alberto Dias, Sr. Walter Pompeu e ao Sr. Paulo Magalhães, pela disposição nas viagens realizadas a área de estudo.

À Coordenação do Curso de Pós-Graduação-CPGG, em especial ao Prof. Dr. Paulo Gorayeb (coordenador) e às secretárias Gladys e Cleidiane, pelo pronto atendimento em todos os momentos dos quais necessitei.

A Luzia Jucá pela sua colaboração inquestionável nos processos administrativos originados no decorrer das atividades deste projeto de pesquisa, assim como pelo apoio na finalização do abstract do referido trabalho.

Agradeço a todos que direta e indiretamente ofereceram qualquer tipo de contribuição para conclusão do presente trabalho.

Quando ouvires os aplausos do triunfo, que ressoem também aos teus ouvidos os risos que provocaste com os teus fracassos.

(Josemaría Escrivá)

SUMÁRIO	Pág.
DEDICATÓRIA	2
AGRADECIMENTOS	3
EPÍGRAFE	5
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	10
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	16
RESUMO	17
ABSTRACT	19
1 - INTRODUÇÃO	21
1.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO.....	22
1.2 - OBJETIVOS.....	24
1.2.1 - Gerais.....	24
1.2.2 - Específicos.....	25
2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA	27
2.1 - CLIMA.....	27
2.2 - VEGETAÇÃO.....	29
2.3 - SOLO.....	30
2.4 - GEOLOGIA.....	31
2.4.1 - Geologia regional.....	31
2.4.2 - Geomorfologia.....	33
2.4.3 - Geologia local.....	36
2.5 - HIDROLOGIA.....	37
2.6 - HIDROGEOLOGIA.....	37
2.7 - TOPOGRAFIA.....	38

3 - PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	40
3.1 - LIXO URBANO.....	42
3.1.1 - Composição do lixo	44
3.1.1.1 - Características do lixo de Belém.....	44
3.1.2 - Classificação do lixo	44
3.1.3 - Poluição pelo lixo	46
3.1.4 - Disposição e controle do lixo	47
3.1.5 - Processo de degradação dos resíduos sólidos	49
3.1.6 - Comportamento subterrâneo do chorume nas zonas não-saturada e saturada	49
4 - TRABALHOS DE PESQUISA DESENVOLVIDOS NA ÁREA	53
5 - METODOLOGIA	57
5.1 - TRABALHO DE CAMPO.....	57
5.1.1 - Método Eletromagnético (EM)	57
5.1.1.1 - Sistema Slingram.....	58
5.1.2 - Determinação de gradiente hidráulico ($\Delta h / L$)	61
5.1.3 - Trabalho topográfico	61
5.1.4 - Condutividade hidráulica (K)	62
5.1.4.1 - Estimativa da condutividade hidráulica (K) através da análise de granulometria.....	63
5.1.4.2 - Ensaio de bombeamento para se determinar a condutividade hidráulica (K).....	63
5.1.5 - Velocidade Real e Aparente dos fluxos subterrâneos	64
5.1.6 - Instalação de poços de monitoramento	65
5.1.7 - Ensaio de permeabilidade	66
5.1.8 - Medição de níveis estáticos nos poços de monitoramento	67
5.1.9 - Coleta de amostras	67

5.1.9.1 - Amostragem de águas subterrâneas.....	67
5.1.9.2 - Amostragem de sedimentos.....	68
5.1.9.3 - Parâmetros físico-químicos medidos em campo.....	68
5.2 - TRABALHO DE LABORATÓRIO.....	68
5.2.1 - Caracterização granulométrica.....	68
5.2.2 - Determinação da porosidade (η).....	70
5.2.3 - Análises químicas em águas subterrâneas.....	71
5.2.3.1 - Parâmetros físico-químicos.....	71
5.2.3.2 - Parâmetros químicos.....	71
6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
6.1 - ESTUDOS GEOFÍSICOS.....	74
6.1.1 - Medidas Eletromagnéticas (EM).....	74
6.2 - CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DA ÁREA.....	83
6.2.1 - Instalação de poços de monitoramento.....	83
6.2.2 - Comportamento do lençol freático.....	86
6.2.3 - Estimativa da condutividade hidráulica.....	91
6.2.3.1 - Utilizando a curva granulométrica.....	91
6.2.3.2 - Determinação da condutividade hidráulica (K) por ensaio de bombeamento.....	96
6.2.3.3 - Ensaio de Permeabilidade.....	99
6.2.4 - Determinação da porosidade.....	101
6.2.5 - Gradiente hidráulico e velocidade dos fluxos subterrâneos.....	102
6.2.6 - Distribuição geométrica dos aquíferos.....	105
6.3 - DESLOCAMENTO SUBTERRÂNEO DO EFLUENTE E SEU EFEITO NA HIDROGEOLOGIA LOCAL.....	107

7 - CONCLUSÕES.....	110
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	112

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Pág.

FIGURAS:

Figura 1.1: Mapa de localização da área de estudo.....	23
Figura 1.2: Fotografia aérea da área de estudo.....	26
Figura 2.1: Distribuição media mensal (anuais) da temperatura do ar, evaporação e umidade relativa do ar.....	27
Figura 2.2: Distribuição media mensal da precipitação pluviométrica anual na cidade de Belém (1961 à 1990).....	28
Figura 2.3: Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém.....	33
Figura 2.4: Mapa geomorfológico da Região Metropolitana de Belém.....	35
Figura 2.5: Mapa topográfico da área de estudo.....	39
Figura 5.1 : Perfil HLEM sobre um corpo condutor. Hp = primário; Hs = campo secundário.....	59
Figura 5.2 : Localização dos perfis eletromagnéticos na área de estudo.....	60
Figura 5.3: Metodologia utilizada na determinação da elevação topográfica de dois poços de observação.....	62
Figura 5.4: Localização dos poços de monitoramento na área de estudo.....	66

Figura 5.5: Diagrama de fluxo para a determinação de silte, areia e argila em sedimentos e amostras de solo.....	69
Figura 5.6: Diagrama Triangular de Piper.....	73
Figura 6.1: Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 1.....	76
Figura 6.2: Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 1.....	77
Figura 6.3: Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 2.....	78
Figura 6.4: Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 2.....	78
Figura 6.5: Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 3.....	79
Figura 6.6: Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 3.....	80
Figura 6.7: Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 4.....	81
Figura 6.8: Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 4.....	81
Figura 6.9: Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 5.....	82

Figura 6.10: Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil.....	83
Figura 6.11: Perfil litológico do poço de monitoramento PM-1.....	84
Figura 6.12: Perfil litológico dos poços de monitoramento PM-2 e PM-3.....	85
Figura 6.13: Perfil litológico dos poços de monitoramento PM-4 e PM-5.....	86
Figura 6.14: Variação de nível estático (PM-1).....	88
Figura 6.15: Variação de nível estático (PM-2).....	89
Figura 6.16: Variação de nível estático (PM-3).....	89
Figura 6.17: Variação de nível estático (PM-4).....	90
Figura 6.18: Variação de nível estático (PM-5).....	90
Figura 6.19: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-1 coletados entre 11m-13m.....	91
Figura 6.20: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-1 coletados entre 19m-21m.....	92
Figura 6.21: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-2 coletados entre 15m-19m.....	92
Figura 6.22: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-3 coletados entre 17m-19m.....	93
Figura 6.23: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-4 coletados entre 4m-12m.....	93

Figura 6.24: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-4 coletados entre 13m-16m.....	94
Figura 6.25: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-5 coletados entre 4m-7m.....	94
Figura 6.26: Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-5 coletados entre 8m-9m.....	95
Figura 6.27: Evolução do rebaixamento do PM-1 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).....	97
Figura 6.28: Evolução do rebaixamento do PM-2 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).....	97
Figura 6.29: Evolução do rebaixamento do PM-3 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).....	98
Figura 6.30: Evolução do rebaixamento do PM-4 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).....	98
Figura 6.31: Evolução do rebaixamento do PM-1 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).....	99
Figura 6.32: Evolução do rebaixamento do PM-1 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).....	100
Figura 6.33: Evolução do rebaixamento do PM-3 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).....	100
Figura 6.34: Evolução do rebaixamento do PM-4 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).....	101

Figura 6.35: Modelo tridimensional mostrando a topografia e o fluxo referente ao período chuvoso.....	104
Figura 6.36: Modelo tridimensional mostrando a topografia e o fluxo referente ao período seco.....	104
Figura 6.37: Visão geométrica frontal dos aquíferos da área de estudo.....	106
Figura 6.38: Visão geométrica lateral dos aquíferos da área de estudo.....	106
Figura 6.39: Diagrama de Piper que mostra o comportamento dos traçadores de chorume.....	109
TABELAS.	
Tabela 2.1: Características vegetais e ambientais da área de estudo.....	30
Tabela 2.2: Coluna estratigráfica regional do nordeste do Pará.....	31
Tabela 3.1: Composição média do lixo urbano brasileiro.....	43
Tabela 3.2: Participação percentual dos diferentes tipos de lixo da cidade de Belém.....	44
Tabela 3.3: Formas de disposição do lixo urbano no Brasil.....	47
Tabela 3.4: Alguns constituintes do chorume, seus mecanismos de atenuação e suas mobilidades.....	52
Tabela 5.1: Valores do coeficiente C	63
Tabela 5.2: Classificação granulométrica dos sedimentos.....	69

Tabela 6.1: Topografia e variações dos níveis estáticos (m) dos poços de monitoramento.....	87
Tabela 6.2: Tamanho efetivo dos grãos, coeficiente de uniformidade e condutividade hidráulica das amostras de perfil coletadas na perfuração dos poços de monitoramento.....	95
Tabela 6.3: Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados.....	96
Tabela 6.4: Valores representativos de porosidade efetiva.....	102
Tabela 6.5: Concentração dos elementos nas amostras de água coletadas nos poços de monitoramento da área de estudo.....	107

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	: Associação Brasileira de Normas Técnicas
COSANPA	: Companhia de Saneamento do Pará
C	: Centígrado
cm	: Centímetro
E	: Leste
EM	: Eletromagnético
EMBRAPA	: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EUA	: Estados Unidos da América
HAB.	: Habitante
Hz	: Hertz
KM	: Kilômetro
KG	: Kilograma
m	: Metro
mm	: Milímetro
NBR	: Normas Brasileiras
NCSRP	: <i>National Contaminated Sites Remediation Program</i> Programa Nacional de Remediação de Áreas Contaminadas
NE	: Nordeste
PM	: Poço de monitoramento
PMB	: Prefeitura Municipal de Belém
RMB	: Região Metropolitana de Belém
RX	: Recepção
t	: Tonelada
TX	: Transmissão
UFPA	: Universidade Federal do Pará
USEPA	: <i>United States Environmental Protection Agency</i> Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos
W	: Oeste

RESUMO

Belém, a maior cidade da Amazônia, com uma população estimada de 1.280.614 habitantes, destina todo o tipo de resíduos produzidos para o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém, o qual foi inaugurado em 1991 e se encontra localizado em Santana do Aurá. Nele são depositados atualmente cerca de 1000 toneladas de resíduos sólidos diariamente, tornando-o uma fonte pontual e permanente de poluição.

O fato de o Lago Água Preta, principal manancial de abastecimento de água da população residencial da Região Metropolitana de Belém, se encontrar localizado a apenas 1,4 km do Depósito de Resíduos do Aurá, tem levantado diversas especulações sobre uma possível contaminação em decorrência da proximidade entre ambos.

Assim sendo, o presente estudo teve como objetivo principal a caracterização hidrogeológica da área localizada entre o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém (Aurá) e o Lago Água Preta, correlacionando dados de estudos geofísicos, hidrogeológicos e geoquímicos, no sentido de se determinar a influência dos contaminantes oriundos do referido depósito de resíduos sobre os recursos hídricos subterrâneos da área de estudo e avaliando a possibilidade de os mesmos virem a influenciar no manancial de abastecimento de Belém.

As medidas geofísicas eletromagnéticas (EM) realizadas, refletiram a presença de camadas argilosas e do lençol freático relativamente próximo à superfície do terreno. Os resultados levantados com este método indireto, permitiram identificar valores anômalos (alta condutividade) em alguns locais, que foram posteriormente verificados mediante a instalação de poços de monitoramento e análise geoquímica de amostras de água.

Na análise hidrogeológica da área, obteve-se um gradiente hidráulico de aproximadamente 0,011, com valores de porosidade efetiva de 28%, condutividade hidráulica entre $4,01 \times 10^{-3}$ e $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s, mostrando que os fluxos subterrâneos se deslocam a uma velocidade de aproximadamente 20,03 m/ano, direcionados para o sentido leste-oeste e leste-sul.

Os aquíferos predominantes da área são do tipo confinado, protegidos por camadas de material argiloso que variam de 4 a 17 metros de espessura e estão associados ao Grupo Barreiras e ao Pós-Barreiras.

Os resultados analíticos obtidos para com os principais traçadores de chorume (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio)

realizados nas amostras de água subterrânea coletadas nos poços de monitoramento, refletiram características ambientais dos recursos hídricos da área, não evidenciando contaminação por chorume nos mesmos.

Numa análise dos parâmetros geoquímicos em conjunto com o sentido dos fluxos subterrâneos, constatou-se que apesar dos fluxos se direcionarem para o lago Água Preta, não se pode afirmar que isso possa acontecer na realidade, visto que além dos resultados analíticos não mostrarem evidência de os recursos hídricos estarem poluídos, devem-se considerar outras variáveis, como a existência de outros poços e principalmente do igarapé Santo Antônio (localizado entre o depósito de resíduos e o lago), que atuam como um sistema drenante dos fluxos superficiais e subterrâneos na área. Esse igarapé atuaria como uma barreira natural e protetora, diminuindo a possibilidade de os aquíferos localizados mais à oeste da área de estudo, serem atingidos por fluxos superficiais e subterrâneos originados do local de descarga dos resíduos sólidos.

ABSTRACT

Belem, the biggest city of the Amazonia, with an estimated population of 1.280.614 habitants, directs all types of residues produced in the urban area to the Metropolitan Waste Deposit, which was inaugurated in 1991 and is located in Santana do Aura. Currently, approximately 1000 tons of solid residues are deposited daily, turning it a local permanent source of pollution.

The fact that the Agua Preta (Black Water) Lake – main source of water supply for the population of the Metropolitan Region of Belem – is located at 1.4 km west of the Residues Deposit of Aura, has raised speculation on the possible of contamination as a result of the proximity between those two locations.

The main goal of the present study is the hydrogeologic characterization of the area located between the Metropolitan Waste Deposit of Belem (Aura) and the Agua Preta Lake, by correlating geophysical, hydrogeologic, and geochemical data, in order to determine the influence of the deriving contaminants of the deposit of residues on the underground water resources of the studied area, and also evaluate the possibility of their influence in the water sources of Belem.

Electromagnetic geophysical measurements (EM) carried through, showed the presence of clayed layers and of the shallow water table. The results achieved through this indirect method allowed the identification of anomalous values (high conductivity) in some locations that were later checked through the installation of monitoring wells and geochemical analysis of water samples.

In the hydrogeologic analysis of the area, a hydraulic gradient of approximately 0.011, effective porosity values 28%, hydraulic conductivity between $4,01 \times 10^{-3}$ and $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s were obtained showing that the underground flows run at approximately 20.03 m/year, in the east-west and east-south directions.

The predominant aquifers in the area are of confined type, protected by layers of clayed material with thickness ranging from 4 to 17 meters and are associated to Barreiras Group and to the Pos-Barreiras unity.

The chemical analysis obtained for leachate tracers (pH, electric conductivity, alkalinity, ammonia, nitrate, chloride, sodium, calcium, magnesium and potassium) carried out in groundwater samples collected from monitoring wells have shown environmental characteristics

of the water resources in the area, not evidencing contamination due to leachate.

The analysis of the geochemical parameters together with the underground flows indicates that in spite of the flow be towards the Agua Preta lake, we cannot affirm that this actually happens because besides the analytical results do not show evidence of water resources pollution, other wells and mainly the narrow Santo Antonio river (located between the deposit and the lake) act as a draining system for the superficial and underground flows in the area. The narrow river would act as a natural and protective barrier, diminishing the possibility of the aquifers located more west in the studied area be reached by superficial and underground flows of leachate generated in the waste deposit.

1 - INTRODUÇÃO

Nos últimos anos a sociedade moderna viveu um grande período de desenvolvimento tecnológico. Após a II Guerra Mundial este ritmo de desenvolvimento foi acelerado com a explosão da sociedade industrial. A industrialização crescente enfatizava a maior produção, enquanto que os efeitos ambientais destas atividades eram colocados em segundo plano, principalmente os impactos diretos e indiretos no solo e nas águas subterrâneas. Nos últimos anos, a sociedade começou a deparar-se com as possibilidades de comprometimento da qualidade e escassez dos elementos naturais, sobretudo a água, causados principalmente pela aceleração da era industrial.

Desde o surgimento dos primeiros centros urbanos, a produção de lixo se apresenta como um problema de difícil solução. A partir da Revolução Industrial, com a intensificação da migração dos trabalhadores do campo para a cidade, aumentaram as dificuldades referentes à produção de resíduos sólidos de diferentes naturezas (domésticos, industriais, serviços de saúde, etc), os quais constituem-se atualmente numa das principais fontes de degradação do meio ambiente.

Em Belém, a maior cidade da Amazônia, com uma população estimada de 1.280.614 habitantes (IBGE, 2000), são visíveis as formas de degradação ao meio ambiente. A cidade cresce de forma confusa e caótica e assim problemas ambientais decorrentes da expansão da metrópole se configuram sobre o meio ambiente oriundos principalmente do crescimento urbano, havendo por isso um quadro sócio-ambiental permissivo e favorecedor de agravos à saúde da população, que ocorrem em grande número, gravidade e proporção.

O Depósito de Lixo Metropolitano de Belém localizado em Santana do Aurá, com acesso pela Estrada do Aurá, a 4,5 km da Rodovia BR-316, foi iniciado em 1991 e, devido a problemas financeiros, uma usina de reciclagem e compostagem e um aterro sanitário, previstos em seu projeto inicial, não foram instalados, tornando o depósito um lixão ao longo dos anos, o qual recebe em torno de 1000 toneladas/dia de resíduos há 12 anos.

O fato do Lago Água Preta, o principal manancial de abastecimento de água da população residencial da Região Metropolitana de Belém, se encontrar localizado a apenas 1,4 km do “Lixão do Aurá”, tem levantado diversas especulações decorrente de sua possível contaminação pela proximidade existente entre ambos.

Assim sendo, a presente dissertação na área de hidrogeologia tende a enfatizar uma investigação sobre o estágio atual de deslocamento do fluxo de chorume oriundo do Depósito de Lixo Metropolitano do Município de Belém em direção ao Lago Água Preta, impondo uma análise mais aprofundada sobre o referido estudo.

A pesquisa faz uma avaliação da direção do fluxo de contaminantes, com vistas à preservação do referido manancial, assim como, conhecer os condicionantes ambientais que possam interferir no mesmo, com a finalidade de ocasionar uma maior proteção da água potável fornecida para a população local.

1.1 - LOCALIZAÇÃO E ACESSO À ÁREA DE ESTUDO

A cidade de Belém está inserida na micro-região Guajarina no Estado do Pará, com uma área territorial de 736 km². Limita-se pela baía de Marajó até o extremo oriental da ilha de Mosqueiro; ao sul, pelo rio Guamá, até a confluência com o rio Mojú; a oeste, pelas baías do Guajará, Santo Antônio e Marajó.

A Grande Belém abrange os municípios de Belém, que tem como principais distritos Icoaraci e Mosqueiro; Ananindeua e parte de Benevides. O município de Ananindeua é contíguo ao de Belém e possui uma área aproximada de 485 km².

O Depósito de Lixo Metropolitano de Belém está situado na localidade de Santana de Aurá, município de Ananindeua, ocupando uma área de 20×10^6 m². No entanto, a área destinada ao aterro é de apenas 800.000 m². É completamente delimitado pelas coordenadas UTM's N 790290 / 791387 e E 9842014 / 9844093. Ao Sul se encontram áreas de baixadas cobertas com densa vegetação que se estendem até o Rio Guamá, ao Leste limita-se com áreas despovoadas e a Oeste está o manancial Água Preta, a uma distância aproximada de 1.400 metros. O seu acesso é feito através de uma estrada secundária localizada ao Norte do referido depósito, a partir do quilômetro 7 da rodovia BR-316. Com altitude média de 10,8 metros, o depósito de lixo do Aurá é circundado por áreas de vegetação nativa e áreas remanescentes da floresta amazônica. (EIA/RIMA-SESAN, 1991; PMB, 1997) (Figura 1.1).

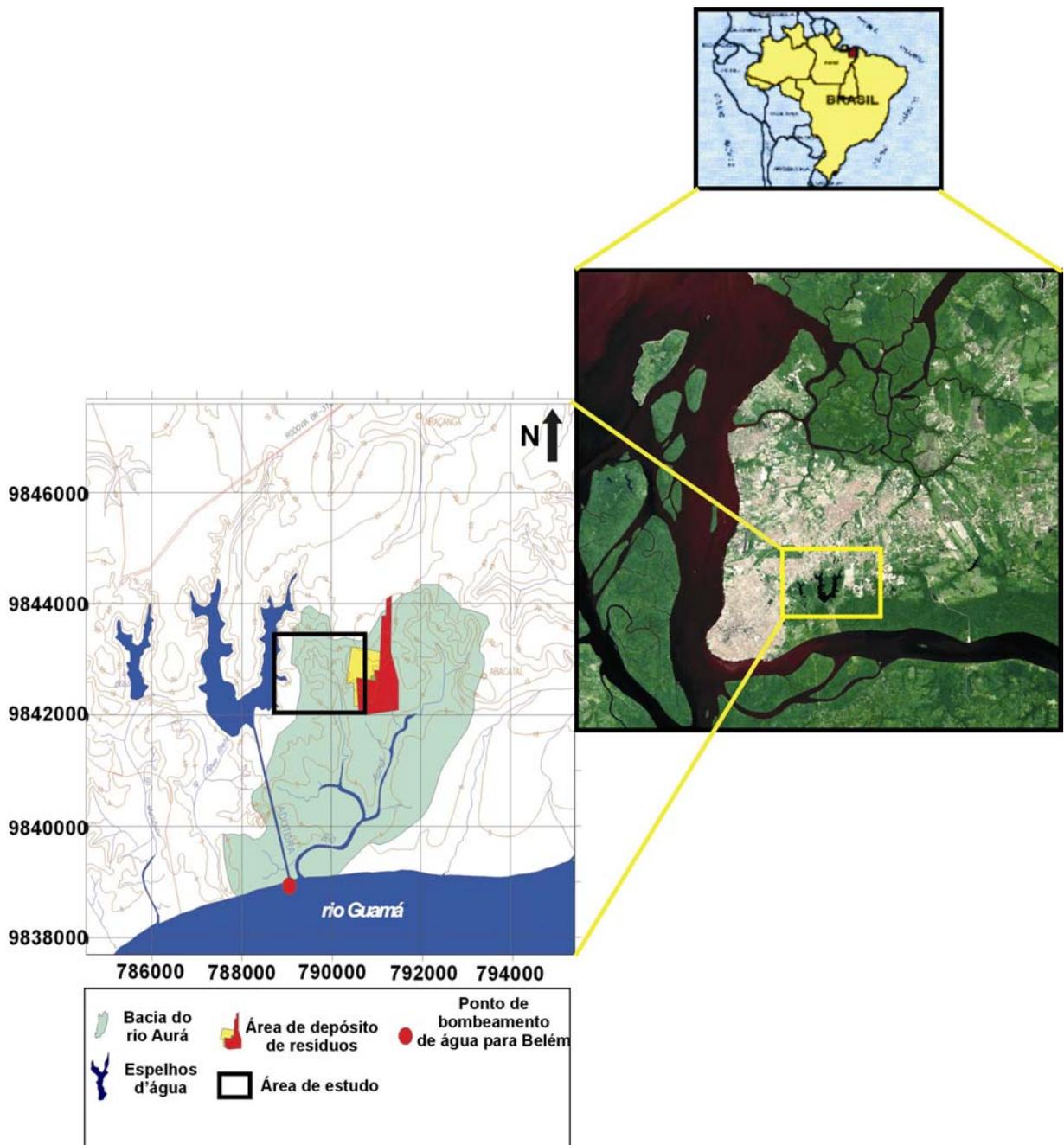


Figura 1.1 - Mapa de localização da área de estudo (modificado de Piratoba Morales, 2002).

A área fisiográfica do Utinga (incluída na área metropolitana de Belém), engloba os mananciais do Utinga, aí incluídos os Lagos Bolonha e Água Preta, com uma área total de 8.989.500 m² (CENSA/COSANPA, 1983).

Os “açudes” representados pelos lagos Água Preta e Bolonha, situados a NE de Belém são os dois grandes reservatórios de água superficial que a cidade utiliza; são eles

formados pela barragem de algumas nascentes e “igarapés” dessa região, reforçados por uma adutora que lhes fornece água do Guamá, captada à montante da aglomeração belenense.

O Lago Água Preta, com uma área total de $7,1995 \times 10^6 \text{ m}^2$, possui sua bacia hidrográfica localizada na Região Metropolitana de Belém, entre a Bacia do Bolonha, BR 316, Águas Lindas e EMBRAPA. É delimitado pelas coordenadas UTM's N 786605 / 789731 e E 9841321 / 9845055. É formado pelas bacias hidrológicas dos Igarapés Catu e Água Preta, do qual recebe o nome. Inicialmente com $6,0 \times 10^6 \text{ m}^3$ de água acumulado, com a construção de sua barragem em 1973, foi ampliado de modo a permitir uma reserva de $10,55 \times 10^6 \text{ m}^3$, passando a ser o principal lago que serve como fonte de abastecimento de água para Belém. É margeado quase que totalmente por uma vegetação exuberante característica da região, que contribui significativamente para a sua preservação natural (CENSA/COSANPA, 1983).

A área de estudo está situada na localidade de Santana de Aurá, município de Ananindeua, ocupando uma área de $2,56 \times 10^6 \text{ m}^2$. Toda a área é delimitada pelas coordenadas UTM's N 790290 / 791387 e E 9842014 / 9844093. Ao Norte da referida área fica a estrada de acesso, ao Sul as áreas de baixadas cobertas com densa vegetação que se estendem até o Rio Guamá, ao Leste limita-se com o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém e a Oeste está o manancial Água Preta (Figura 1.2).

1.2 - OBJETIVOS

1.2.1 - Gerais

- Caracterização hidrogeológica da área localizada entre o Lago Água Preta e o Depósito de Lixo Metropolitano de Belém (Aurá), avaliando a possibilidade de avanço do chorume em direção ao referido lago.

- Determinar a influência do Depósito de Lixo do Aurá sobre os recursos hídricos subterrâneos da área de estudo através de estudos hidrogeológicos, geofísicos e geoquímicos.

1.2.2 - Específicos

- Determinar a influência do chorume nos recursos hídricos subterrâneos, mediante metodologias indiretas (Sondagens Eletromagnéticas - SEM) e diretas (poços de monitoramento e análises de traçadores de chorume em amostras de água subterrânea);

- Determinar as variáveis hidrodinâmicas (condutividade hidráulica (K), porosidade (η), gradiente hidráulico (i), etc), necessárias para estimar a velocidade dos fluxos subterrâneos na área e avaliação de um provável deslocamento dos poluentes produzidos no Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá;

- Dimensionamento e caracterização dos aquíferos existentes na área de estudo.



Figura 1.2 - Fotografia aérea da área de estudo.

2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

2.1 - CLIMA

A Região Metropolitana de Belém possui um clima quente e úmido, apresentando uma pluviosidade elevada, em média de 2.800 mm/ano, com freqüentes chuvas no período tarde/noite.

A umidade relativa do ar, com média anual de 85%, favorece a formação de chuvas de convecção, cuja precipitação se evidencia após a insolação máxima diurna, ou seja, durante a tarde ou princípio da noite.

Segundo Penteado¹ *apud* Sauma Filho (1996), as amplitudes térmicas são inferiores a 2° C (variação entre os períodos mais quentes e os mais frios), observando-se que os valores são calculados pelas médias dos meses mais quentes e mais frios.

Assim sendo, nas horas de maior insolação, a temperatura fica em torno de 30° C e durante a madrugada esta temperatura situa-se em torno de 23° C (Figura 2.1).

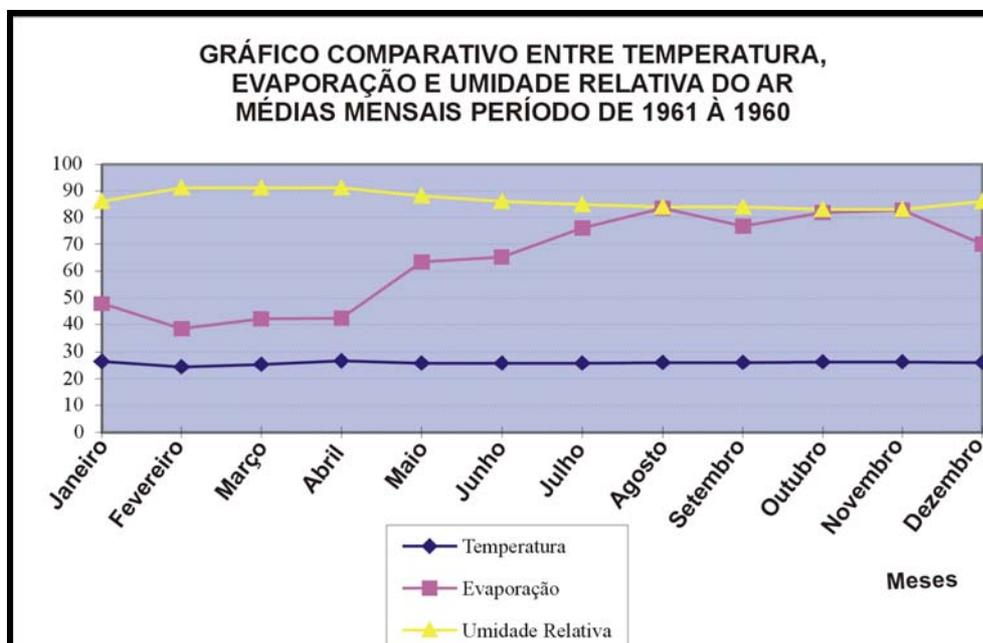


Figura 2.1 - Distribuição média mensal (anuais) da temperatura do ar, evaporação, umidade relativa do ar (modificado de Piratoba Morales, 2002).

¹ PENTEADO, A.R. 1967. Geografia Urbana de Belém. Belém. Universidade Federal do Pará. 2v.

A área de estudo apresenta um clima equatorial úmido, sendo classificada através de Koppen, como um clima do tipo Af (Diniz, 1986; Vieira & Santos, 1987; Santos, 1991), sendo:

A = clima tropical chuvoso, onde a temperatura média do mês mais frio é superior a 18° C.

F = chuvas abundantes durante todo o ano, com totais pluviométricos mensais iguais ou superiores a 60mm, condicionado ao tipo de vegetação conhecida como Floresta Tropical.

I = o clima não conhece variação estacional sensível, dada a baixa oscilação anual de temperatura, inferior a 5° C.

A coluna pluviométrica alcança cotas elevadas, atingindo uma média total anual de 2500 – 3000 mm, com cerca de 180 dias de chuva, logo possui estações reguladas pela pluviosidade e não pela temperatura; apresentando, neste sentido, duas estações definidas – estação chuvosa e seca – segundo a maior ou menor frequência de chuvas (Diniz, 1986).

De maneira geral, a época mais chuvosa (localmente denominada inverno) ocorre normalmente a partir de dezembro e tem duração de cinco ou seis meses, sendo março, o mês mais chuvoso. Na época menos chuvosa (localmente denominada verão), de julho a novembro é a época em que predominam as chuvas de caráter convectivo, geralmente de grande intensidade e curta duração (Figura 2.2).

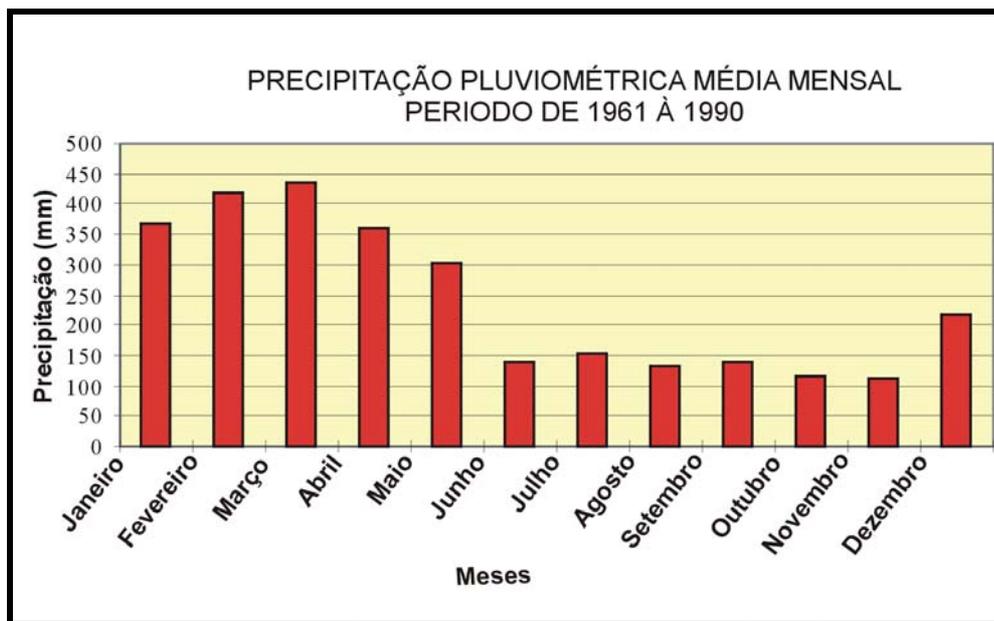


Figura 2.2 - Distribuição média mensal da precipitação pluviométrica anual na cidade de Belém (1961 a 1990) (Pará, 1995).

2.2 - VEGETAÇÃO

A cobertura vegetal predominante na Região Amazônica é do tipo floresta densa, ocorrendo manchas de cerrado na faixa sedimentar de idade paleozóica no norte e na porção oriental da ilha de Marajó.

O mapeamento da vegetação da área metropolitana de Belém e Ananindeua revela áreas ainda cobertas por vegetação primitiva e de áreas que sofreram influência antrópica.

Esta cobertura vegetal pode ser representada por dois tipos bem diferenciados de florestas, as de Terra Firme, subdivididas em Floresta Densa de Terra Firme, Floresta Aberta de Terra Firme e Capoeira de Terra Firme e as de Várzea classificadas como Florestas de Várzea, Floresta de Igapó Original e Capoeira de Várzea. A diferenciação fitofisionômica está em função do solo, da topografia e das águas (Moreira, 1966). Atualmente, em virtude da influência antrópica, a sua fitofisionomia encontra-se bastante alterada, com áreas de florestas remanescentes, intercaladas com capoeira e áreas de pequeno cultivo ao longo das rodovias e hidrovias e próximas a povoados. Ocorrem ainda, Florestas Secundárias, áreas de Campos e áreas de Capoeiras, onde antigamente assentava-se a floresta original

A tipologia dominante na área do Utinga é a floresta tropical úmida perenifólia. Apresenta-se com boa heterogeneidade, composta de espécies cotiledôneas, de porte médio a alto e grandes variações em sua densidade. A variação, no que se refere ao tamanho e a frequência de determinadas espécies em ocorrências localizadas, surge em função da inundação de áreas florestais, provocadas pela construção da barragem no curso das águas no Lago Bolonha e Água Preta e pelo desmatamento para ocupação de diversas origens: agrícolas, habitacionais, empreiteiras, além de outras. As condições abaixo são consideradas como determinantes na divisão fitotipológica da área do Utinga (Dias, 1991):

- Floresta Densa de Terra Firme;
- Floresta de áreas inundadas ou sujeitas à inundação;
- Floresta secundária;
- Campos gramíneos;
- Área urbana.

A área de estudo se caracteriza pela presença em sua grande parte de uma Floresta Equatorial, mata ciliar e mata de Igapós parcialmente preservada. No entanto, em seu perímetro Leste verifica-se a predominância da uma Floresta Equatorial totalmente devastada pela exploração de argila e pela deposição de resíduos sólidos (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 - Características vegetais e ambientais da área de estudo.

Área	Tipo de floresta	Situação atual
Perímetro Leste	Floresta equatorial	Devastada pela exploração de jazida de argila e disposição de resíduos sólidos
Perímetro Central	Floresta equatorial e mata ciliar	Parcialmente preservada
Perímetro Oeste	Floresta equatorial e mata ciliar	Parcialmente preservada
Perímetro Norte	Floresta equatorial	Parcialmente preservada
Perímetro Sul	Mata de Igapós	Parcialmente preservada

2.3 - SOLO

Predominam na área de estudo, solos do tipo Latossolos Amarelo, seguido do Concrecionário Laterítico, Glay pouco húmico, Podzol Hidromórfico e Areias Quartzosas (Vieira & Santos, 1987).

Formado a partir de sedimentos do Grupo Barreiras na região, o Latossolo Amarelo é um solo profundo e envelhecido, ácido a fortemente ácido ($\text{pH} \cong 4,1-5,3$) e de boa drenagem (Farias et al, 1992).

Segundo Farias et al. (1992), o tipo de solo denominado Concrecionário Laterítico é bastante antigo e intemperizado, apresenta em sua constituição uma mistura de partículas mineralógicas finas e concreções de um arenito ferruginoso. É um solo originado dos sedimentos argilo-arenosos do Grupo Barreiras e sua ocorrência aparece em relevo suave ondulado e forte ondulado. Os solos do tipo Glay pouco húmico apresentam, originalmente, sedimentos recentes do Quaternário, elevados teores de matéria orgânica, são fortemente ácidos ($\text{pH} 3,5 - 5,7$) e mal drenados. Em Belém, geralmente são relacionados aos rios de água barrenta e encontram-se em planícies aluviais e de inundação, áreas de baixadas e próximo aos rios.

Os solos Podzólicos Hidromórficos se caracterizam por possuir uma textura arenosa,

geralmente profundos, acidez elevada (pH 4,1 – 5,0), horizontes bem diferenciados e baixa fertilidade natural. Desenvolvem-se sobre sedimentos fluviais e marinhos oriundos do Quaternário.

As Areias Quartzosas são solos originados de sedimentos arenosos do Quaternário, fortemente drenados, bastante permeáveis e com conteúdo de argila inferior a 15%.

2.4 - GEOLOGIA

2.4.1 - Geologia regional

O nordeste do Estado do Pará, região na qual situa-se a Região Metropolitana de Belém, tem sua geologia representada por unidades do Pré-Cambriano, Paleozóico e Cenozóico (Tabela 2.2).

Tabela 2.2 - Coluna estratigráfica regional do nordeste do Pará.

ERA	PERÍODO	ÉPOCA	UNIDADE	DESCRIÇÃO SUMÁRIA
Cenozóico	Quaternário	Holoceno	Sedimentos Modernos	Areias de granulometria fina a média, creme, intercaladas a argilas escuras, com restos vegetais, distribuídas nas orlas dos rios e igarapés.
		Pleistoceno	Pós-Barreiras	Sedimentos inconsolidados, areno-argilosos, finos a médios, com concreções ferruginosas.
	Terciário	Mioceno-Plioceno	Grupo Barreiras	Arenitos ferruginosos, areias finas a médias, siltosas e argilas.
		Oligo-Mioceno	Formação Pirabas	Calcáreos fossilíferos e margas, intercalados com folhelhos rítmicos e arenitos calcíferos.
Paleozóico			Formação Piriá	Arcóseos a sub-arcóseos, finos a grossos, de cor cinza.
Pré-Cambriano				Granitos, gnaisses, quartzitos, xistos e filitos.

Fonte: Sauma Filho (1996).

Segundo Sauma Filho (1996), o Pré-Cambriano se caracteriza por um conjunto de rochas agrupadas no Complexo Maracaçumé, Formação Santa Luzia, Formação Tromai, Formação Gurupi, Formação Igarapé de Areia, Formação Vizeu e Granito Cantão.

O Paleozóico encontra-se unicamente com sedimentos da Formação Piriá e no Cenozóico encontramos o Grupo Barreiras e a Formação Pirabas. As rochas deste grupo cobrem cerca de 65% da área total da região e são recobertos pelos sedimentos do “Pós-Barreiras” e sedimentos modernos.

O Grupo Barreiras é representado por sedimentos continentais (Mioceno/Plioceno), apresentando uma variedade de tipos litológicos que variam de argilito a conglomerado. No entanto, de maneira geral, predominam arenitos finos e siltitos bem estratificados nas cores amarela, vermelha, branca e roxa.

O Pós-Barreiras (Pleistoceno) é litologicamente constituído por sedimentos areno-argilosos, quartzosos, inconsolidados, de coloração amarelada, geralmente mal selecionados, com granulometria fina a média, com seixos milimétricos de quartzo e concreções ferruginosas.

A cobertura sedimentar Quaternária (Holoceno) se distribui por toda área, ocupando cotas baixas, situando-se ao longo de igarapés e vales de rios às margens da baía de Guajará. É representado por depósitos aluvionares constituídos de areia, silte e argila, com matéria orgânica e localmente laminado e apresentam uma espessura máxima em torno de 30 metros.

A área estudada está situada em uma província geológica de cobertura Cenozóica, cujos terrenos se constituem de rochas sedimentares que podem atingir até 4 km de espessura e que pertencem à Bacia Sedimentar do Amazonas, sobrejacente a um substrato granito-gnássico. São considerados terrenos geologicamente novos e pela sua origem, situação e constituição, apresentam as mesmas características geomorfológicas e litogenéticas desta imensa bacia, salvo algumas ligeiras modificações locais.

Segundo Farias et al. (1992), as observações geológicas de superfície identificaram que os terrenos de Belém e seus arredores são formados em quase sua totalidade por sedimentos arenosos da unidade Pós-Barreiras (Figura 2.3).

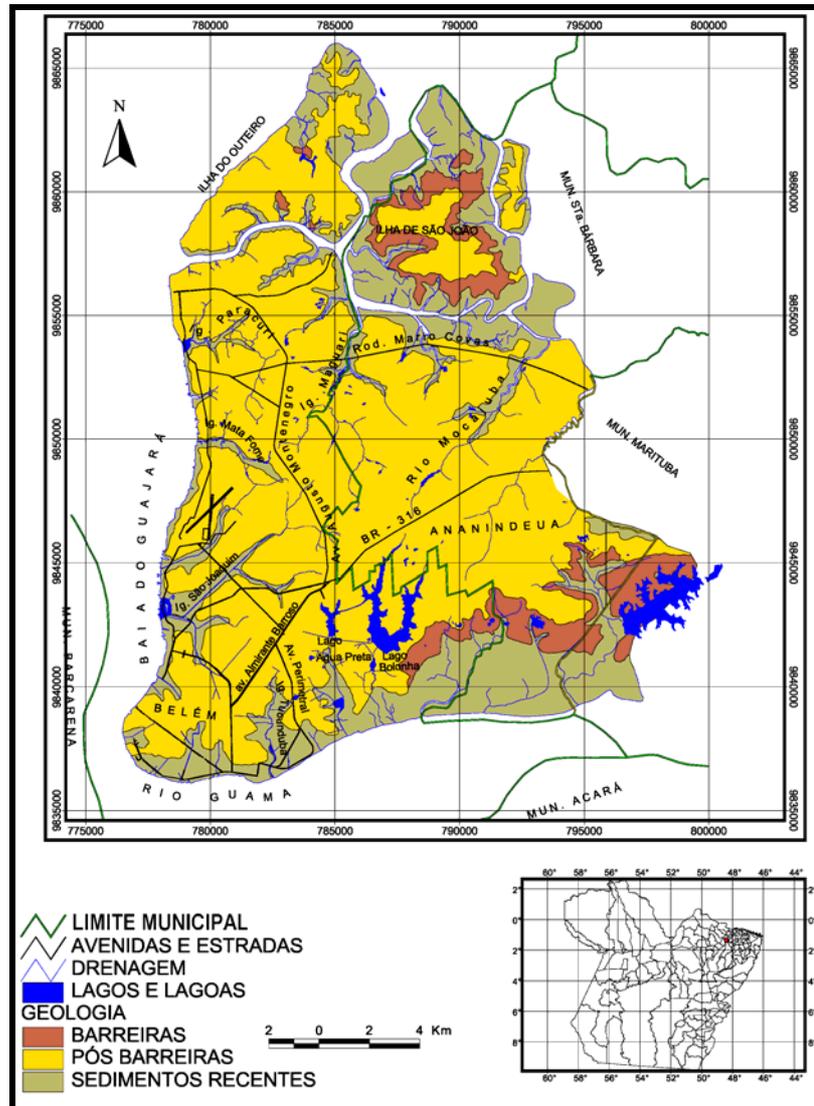


Figura 2.3 - Mapa geológico da Região Metropolitana de Belém (Matta, 2002)

2.4.2 - Geomorfologia

Segundo Farias et al., (1992), as características inerentes à morfologia de Belém podem ser divididas em três unidades:

1. Terrenos Sedimentares do Quaternário / Pleistoceno

São constituídos por superfícies pediplanas aplainadas, que surgem em alguns locais com ondulações de vertentes suaves e topos arredondados, apresentando níveis de concreções ou carapaças ferruginizadas de areia ou argila, provavelmente pertencentes à base de sedimentos do

Pós-Barreiras. Suas unidades mais elevadas correspondem aos tabuleiros e os mais baixos aos terraços baixos e os mesmos se inserem na unidade regional dos baixos platôs do Planalto da Amazônia (Vieira & Santos, 1987) e na unidade de Terrenos Sedimentares do Terciário (CODEM, 1975).

2. Terrenos Sedimentares do Quaternário/Holoceno

Localizam-se principalmente nas áreas de baixadas da Região Metropolitana de Belém, localizadas nas adjacências da baía do Guajará e do rio Guamá. São constituídos por sedimentos argilosos, inconsolidados, assemelhando-se regionalmente a Planície Amazônica que se trata de uma unidade de relevo localizada em uma faixa nas duas margens do Amazonas, alargando-se na região da foz nas inúmeras ilhas, incluindo Marajó. Tem características bem distintas não comparáveis a nenhuma outra área de planície no que diz respeito à particularidade e diversidade de feições que apresenta. Esta planície tem partes sujeitas a inundações periódicas pelas chuvas ou pelas cheias de um dos rios e vem acompanhando as margens do Rio Guamá, o furo da Marinha e o baixo curso de seus afluentes. A inundação é um dos elementos que possibilita a sedimentação recente de uma grande área contribuindo também para fixação através da vegetação rasteira. Os canais marcam a orientação da sedimentação e os diques marginais são os reflexos de um dos últimos eventos de todo um processo de sedimentação.

3. Zona Rebaixada e Terraços Fluviais Inundáveis

Caracteriza-se por cotas topográficas baixas (em torno de 4 metros), é considerada pobre topograficamente, sendo presenciada nas áreas de baixadas da Região Metropolitana de Belém com ocorrências de inundações periódicas. No decorrer de épocas chuvosas ou de afluxo das marés é responsável pelo represamento dos cursos d'água, causando inundações nos terrenos de planície e sedimentação.

Na área de estudo encontramos o Planalto Rebaixado da Amazônia, uma extensa superfície do Pediplano Pleistocênico, que se limita nas margens do rio com a Planície Amazônica. Seu relevo corresponde a uma extensa superfície plana, suavemente ondulada e dissecada, desenvolvido em rochas do Grupo Barreiras e do Pós-Barreiras. As flutuações dos níveis de base da rede hidrográfica engendraram processos erosivos e/ou de sedimentação e o clima e as flutuações eustáticas influenciaram nos níveis de base dos aplainamentos (Piratoba Morales, 2002).

A Figura 2.4 apresenta o mapa geomorfológico da Região Metropolitana de Belém, onde percebe-se que as principais unidades morfoestruturais encontradas, são resultantes dos processos geomorfológicos das paisagens constituídas pelo Planalto Rebaixado da Amazônia e pela Planície Amazônica.

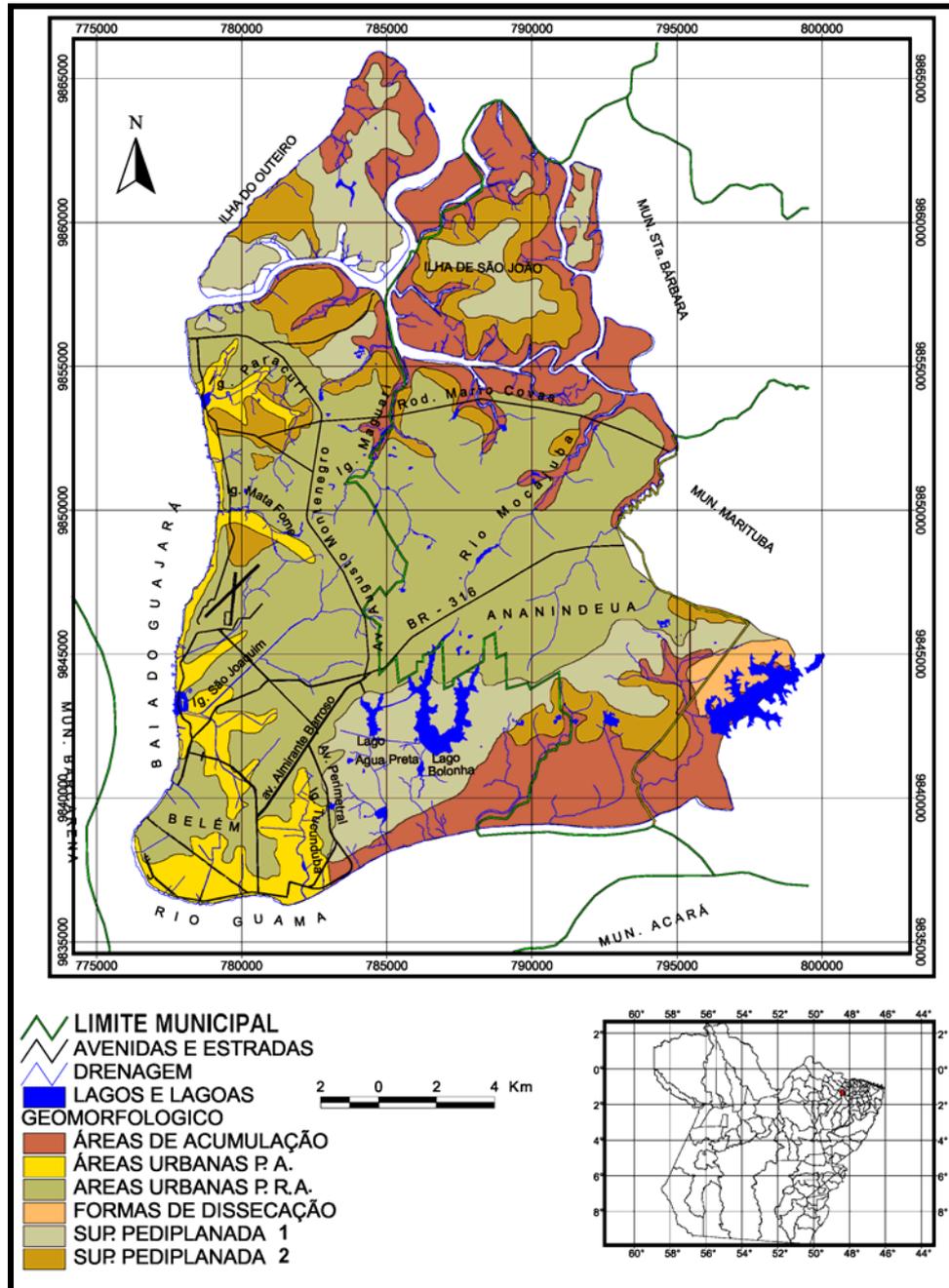


Figura 2.4 - Mapa geomorfológico da Região Metropolitana de Belém (Matta, 2002).

2.4.3 - Geologia local

O pacote que acumula água subterrânea na RMB e municípios circunvizinhos (Santa Izabel do Pará, Castanhal, etc) é formado por quatro unidades geológicas, assim sintetizadas: Grupo Barreiras, Pós-Barreiras, Formação Pirabas e Aluviões. Os terrenos que constituem a região de Belém são de rochas sedimentares sobrejacentes a um substrato granito-gnáissico (IDESP, 1980). Esse pacote sedimentar pertence à bacia sedimentar da foz do Amazonas e pode atingir mais de 4.000 metros de espessura. Na parte superior, a partir da superfície, encontram-se depósitos sedimentares do Quaternário e Terciário.

O conjunto dos lagos do Utinga, está assentado integralmente sobre sedimentos do Quaternário antigo e recente, provindo do Grupo Barreiras (Dias, 1991). Rossetti² *et al. apud* Bastos (1991), descreve os sedimentos Barreiras como depósitos terrígenos continentais terciários, constituídos por conglomeráticos polimíticos, com intercalação de sedimentos arenosos e argilosos, com as frações arenosas apresentando uma grande diversidade faciológica. Os litotipos que compõem a moldura geológica da área estão dentro dos domínios das coberturas fanerozóicas e acham-se representados por uma seqüência carbonática em subsuperfície, denominada Formação Pirabas, de idade miocênica, e recoberta por sedimentos clásticos do Grupo Barreiras e Pós-Barreiras de idades terciária e quaternária, respectivamente. Ainda há, no Quaternário, os sedimentos aluvionares inconsolidados que jazem na faixa costeira, leitos das drenagens e manguezais.

Um perfil litológico básico obtido localmente na área de Santana do Aurá por Bastos (1991), a partir de mapeamento geológico e perfilagem gama em poços rasos (15m) que cortam as unidades aquíferas do município de Ananindeua, mostra que a mesma é formada por sedimentos argilosos a siltosos de coloração variegada, gradando para uma areia média, de coloração creme, intercaladas com concreções de argila, níveis de areia fina vermelha e siltes variegados. Acima desta seqüência, encontram-se intercalações de silte argilosos, amarelado; silte arenosos vermelhos, argila siltosa cinza escuro com matéria orgânica e níveis de areia grossa.

Os principais aquíferos são constituídos por sedimentos clásticos arenosos do Quaternário, do Grupo Barreiras e da Formação Pirabas.

² ROSSETTI, D. de F.; TRUCKENBRODT, W.; GOÉS, A.M. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Série Ciências da Terra, **1**(1): 25-71.

2.5 - HIDROLOGIA

Os elementos hídricos de maior expressão, devido suas relações diretas e imediatas com a cidade de Belém, são a baía do Guajará e o rio Guamá, além de inúmeros igarapés que cortam a cidade. Os igarapés se destacam em sua importância, quando se relacionam com a topografia e com a formação e evolução dos vales, que modelam os diferentes níveis de relevos existentes.

A baía de Guajará faz parte do estuário do Rio Amazonas e tem continuidade na baía de Marajó, sofrendo diretamente a influência das marés oceânicas. Suas águas são barrentas e no período de baixa pluviosidade na região, ficam salobras devido ao “avanço” das águas oceânicas.

O rio Guamá margeia a cidade de Belém ao sul e deságua na baía de Guajará, possui águas pouco transparentes, com grande quantidade de material argiloso em suspensão, proveniente de atividades erosivas em suas margens, tornando suas águas turvas de coloração amarelada. Sua importância se encontra no fato de que a COSANPA posicionou em seu leito uma adutora (agora duplicada), que direciona a água deste rio para seus reservatórios naturais, compostos pelos lagos Bolonha e Água Preta.

A rede hidrográfica da área em estudo é representada principalmente pelo rio Aurá, principal tributário do rio Guamá. O Depósito de Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Belém e os lagos Bolonha e Água Preta se encontram localizados no sistema hídrico do Utinga, que compreende um conjunto de bacias superficiais e subterrâneas em áreas da microbacia do Aurá, na extremidade sudeste da área, formada por drenagens de pequeno porte e de pouca extensão, como os igarapés Santo Antônio, Pescada, Juvêncio, Juruca e Santana, com nascentes no próprio local.

2.6 - HIDROGEOLOGIA

Os principais aquíferos da Região Metropolitana de Belém são constituídos pelos sedimentos clásticos arenosos do Quaternário, do Grupo Barreiras e da Formação Pirabas.

Segundo Pereira et al. (1994), os aquíferos do Quaternário são formados por areias finas a médias, quartzosas, de origem continental, cuja espessura de sedimentos média é de cerca de 20 metros. Localizam-se geralmente na parte superior do terreno, com pequena distribuição

espacial e apresentando alta vulnerabilidade à contaminação.

O aquífero do Grupo Barreiras se constitui de areias finas a médias, às vezes grosseiras, conglomeráticas, quartzosas, com distribuição espacial irregular, sendo variável em profundidade, espessura, continuidade lateral e características hidrodinâmicas. Apresenta intercalações com camadas argilosas e sua espessura máxima é de 100 metros. Em alguns locais seus horizontes lateríticos podem apresentar cavidades intercomunicantes, constituindo-se em aquíferos de elevada transmissividade, tornando-o assim o mais explorado da Região Metropolitana de Belém.

O aquífero da Formação Pirabas se constitui por areias e arenitos, de granulação fina, média e grossa e seixos arredondados a sub-arredondados de quartzo. Com uma profundidade em geral a partir de 100 metros, são intercalados com argilas, margas, calcáreos e argilitos.

2.7 - TOPOGRAFIA

A área de estudo possui aproximadamente 256 ha. As cotas mais altas foram identificadas na porção nordeste e sul da área na ordem de 15-18m, enquanto na porção oeste e centro-sul se encontram as cotas mais baixas, na ordem de 5-9m (Figura 2.5).

Adjacente ao depósito de resíduos sólidos, há uma grande área devastada pela extração de material de construção, que apresenta confinamento de águas superficiais pontuais em toda sua extensão.

O solo natural da área, em sua grande parte, é caracterizado por camadas do tipo argilo-arenoso em que a declividade natural do terreno indica um caimento no sentido leste-oeste e leste-sul, o que proporciona o escoamento das águas superficiais em direção ao Igarapé Santo Antônio e ao Rio Guamá.

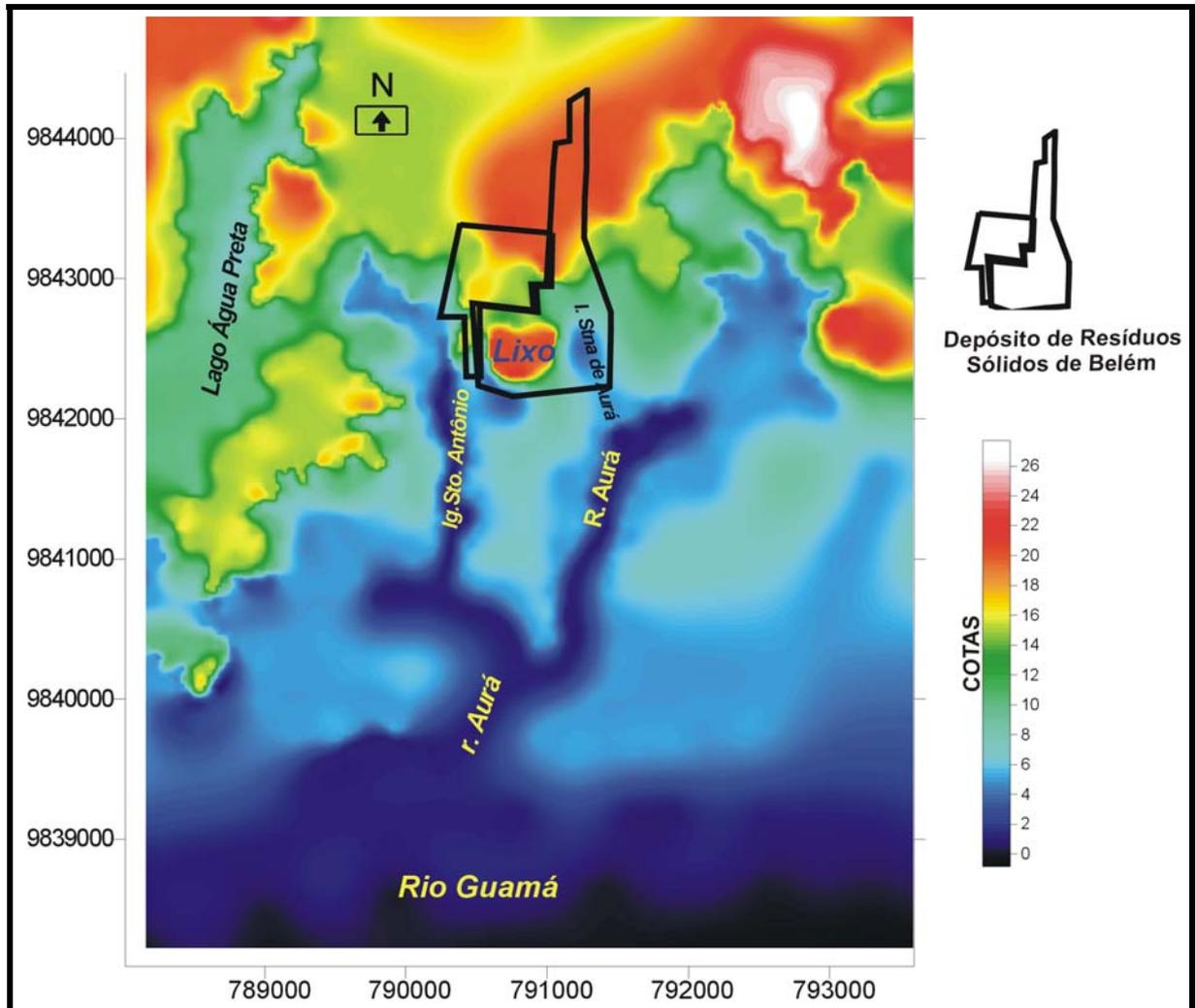


Figura 2.5 - Mapa topográfico da área de estudo (modificado de Piratoba Morales, 2002).

3 - PROBLEMÁTICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

Um dos problemas mais sérios que qualquer cidade enfrenta, mas que é particularmente grave nas enormes aglomerações urbano-industriais, é o lixo sólido.

Trata-se de um problema inerente à cidade, devido a mesma processar uma incrível quantidade de matéria e energia, além de toneladas e toneladas de dejetos que não são metabolizados por ela. Os excedentes vão se acumulando cada vez em maior escala, colocando a questão do lixo urbano como uma das mais sérias a ser enfrentada atualmente. Com a elevação da população e, principalmente, com o estímulo dado ao consumismo, o problema tende a se agravar.

A partir daí, o destino do lixo passa a ser um dos temas de enorme gravidade. Trata-se de saber como se livrar do que é considerado inservível e de reconhecer que se está diante de um problema ambiental de grandes proporções.

A grande preocupação em torno do destino do lixo se dá principalmente em face da sua característica de inesgotabilidade, comprometimento de grandes áreas e pela sua complexidade estrutural, devido a grande heterogeneidade de materiais, desde substâncias inertes a substâncias altamente tóxicas. A heterogeneidade é uma das características principais dos resíduos sólidos urbanos, que apresentam uma composição qualitativa e quantitativa muito variada. Essas variações ocorrem geralmente em função do nível de vida e educação da população, do clima, dos modos de consumo, das mudanças tecnológicas, etc.

Diariamente, grande quantidade de lixo é produzida no meio urbano, necessitando de um destino final adequado. Segundo Oliveira (1997), a quantidade média de lixo produzida por habitantes nas cidades brasileiras é de 0,5-2,5 kg/hab/dia, o que nos leva a inferir que no Brasil a produção média mínima chega a aproximadamente 180 kg/hab/ano. Para se ter uma idéia da gravidade do problema, se cada pessoa produzir diariamente, um quilo de lixo, significará 6 milhões de toneladas diárias nos próximos dias. Esta média, entretanto, não leva em consideração o lixo industrial, os dejetos da área rural e o material jogado nos campos e rios.

Apesar do nosso grau de desenvolvimento técnico-científico, os problemas sanitários urbanos, mais especificamente o saneamento do lixo, não tem acompanhado esse ritmo, como também foi o que menor progresso obteve (Otero, 1966).

Via de regra, expressivas quantidades de lixo vêm sendo armazenadas em áreas não

apropriadas ou simplesmente despejadas em lugares abertos, sem a mínima preocupação com a higiene ambiental. Como consequência, tem-se a contaminação dos recursos hídricos superficiais e subterrâneos, do solo, do ar e a degradação da paisagem, além da proliferação e disseminação de agentes patogênicos, de macrovetores (ratos, moscas, baratas, cães, aves, catadores) e de microvetores (bactérias, vermes, fungos e vírus), transformando esses locais numa fonte difusora de doenças.

Considerando alimentos, energia e recursos naturais, o mundo já está consumindo 40% além da capacidade de reposição da biosfera e esse déficit aumenta 2,5% ao ano. No Brasil, são diariamente despejadas na natureza 125 mil toneladas de rejeitos orgânicos e de material potencialmente reciclável (PNUD, 2001).

Dados do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatísticas – IBGE (2000) indicam que 76% do lixo coletado no país – cerca de 20 milhões de toneladas por ano – são jogados a céu aberto. Restos orgânicos, sobretudo de alimentos e papéis sanitários, compõem 60% desses despejos, enquanto que nos países desenvolvidos, os restos orgânicos representam apenas 10%.

A Região Metropolitana de Belém (RMB), também apresenta este grave problema ambiental e sanitário, visto que em 1991 possuía um projeto para a deposição de resíduos sólidos, o qual incluía três unidades básicas: uma usina de incineração, uma usina de reciclagem e compostagem e um aterro sanitário. No entanto, por falta de recursos financeiros para a manutenção, as duas primeiras unidades não foram habilitadas, o que acarretou um excesso à área destinada ao aterro, transformando o mesmo em uma fonte pontual e permanente de poluição antropogênica, colocando em risco os recursos ambientais da área (IPEA & COHAB, 1997).

3.1 - LIXO URBANO

A palavra **lixo**, derivada do termo latim *lix*, significa "cinza". No dicionário, ela é definida como sujeira, imundice, coisa ou coisas inúteis, velhas, sem valor. Lixo, na linguagem técnica, é sinônimo de resíduos sólidos e é representado por materiais descartados pelas atividades humanas. Desde os tempos mais remotos até meados do século XVIII, quando surgiram as primeiras indústrias na Europa, o lixo era produzido em pequena quantidade e constituído essencialmente de sobras de alimentos.

A partir da Revolução Industrial, as fábricas começaram a produzir objetos de consumo em larga escala e a introduzir novas embalagens no mercado, aumentando

consideravelmente o volume e a diversidade de resíduos gerados nas áreas urbanas. O homem passou a viver então a era dos descartáveis em que a maior parte dos produtos — desde guardanapos de papel e latas de refrigerante, até computadores — são inutilizados e jogados fora com enorme rapidez. Ao mesmo tempo, o crescimento acelerado das metrópoles fez com que as áreas disponíveis para colocar o lixo se tornassem escassas. A sujeira acumulada no ambiente aumentou a poluição do solo e das águas e piorou as condições de saúde das populações em todo o mundo, especialmente nas regiões menos desenvolvidas. Até hoje, no Brasil, a maior parte dos resíduos recolhidos nos centros urbanos é simplesmente jogada sem qualquer cuidado em depósitos existentes nas periferias das cidades. O lixo urbano é, portanto um dos maiores problemas ambientais da atualidade, pois os moldes de consumo adotados pela maioria das sociedades modernas estão provocando um aumento contínuo e exagerado na quantidade de lixo produzido.

3.1.1 - Composição do lixo

O crescimento populacional de hoje não tem precedentes. Segundo cálculos da Organização das Nações Unidas (PNUD, 2001), cerca de 150 pessoas nascem a cada minuto. Teóricos crêem que a Terra está próxima do máximo de habitantes que pode alimentar, mas não há consenso. Na agricultura, o uso da água supera a taxa de reposição. A péssima distribuição de alimentos e de riquezas já vem comprometendo há muito o equilíbrio social e catástrofes em série se anunciam através do esgotamento dos recursos naturais – o alimento entre eles – e o aumento da poluição com o acúmulo de dejetos de toda a espécie.

Além de todos os tipos de lixo normal, que incluem a matéria orgânica do dia-a-dia, restos de alimentos, o material reciclável, entre outros mais comuns, alguns tipos não despertam cuidados e podem causar sérios danos ao ambiente, principalmente por conter elementos químicos na forma iônica que são absorvidos e acumulados pelo organismo.

São elementos presentes em cosméticos e maquiagens, como alumínio, que pode causar a Síndrome de Alzheimer; nas pilhas e baterias, que lança níquel e cádmio no ambiente; nas lâmpadas que possuem mercúrio, um metal pesado e tóxico que pode contaminar solos e a água; nas pastilhas e lonas de freios, que contém amianto e se acumula nos pulmões; nos

materiais de eletrônica, que contém chumbo; nos fertilizantes, que são ricos em fósforo, o lixo radiativo, proveniente de usinas, máquinas de radioterapia e raios-X (césio).

Alguns elementos radiativos podem levar milhares de anos para serem absorvidos pela natureza. A radiação destrói as células humanas, matando-as ou causando mutações. Só das usinas nucleares, o plutônio, que é o mais perigoso dos subprodutos radiativos e também o de mais longa vida, mantém sua periculosidade durante, pelo menos, 500 mil anos. Este é, aliás, o período de tempo em que o elemento deve permanecer isolado do meio ambiente. Meio milionésimo de grama deste elemento - uma dose invisível – é cancerígeno. Cerca de 500 gramas, se uniformemente distribuídos, poderiam induzir potencialmente o câncer pulmonar em todas as pessoas do planeta.

O lixo invisível é tão ou mais abundante que o domiciliar e industrial. Diariamente são emitidos milhares de toneladas de gases na atmosfera e aumenta diuturnamente a carga de elementos da chamada poluição invisível (compostos orgânicos voláteis). Há muita coisa para fazer com relação à população, mas o mais difícil de enfrentar é o excesso do consumo, que produz também lixo em excesso e outros elementos de alta periculosidade.

O lixo visível do Brasil chega em média a 125 mil toneladas por dia, quase um milhão por semana. Cerca de 75% dessa produção vai para os grandes lixões. Grande parte do material depositado nos lixões pode levar até 400 anos para se decompor, outra parte é composta por lixo tóxico misturado com restos de alimentos. Menos de 1% do lixo orgânico é destinado para usina de compostagem, apenas 0,1% é incinerado. A maior parte do lixo domiciliar no Brasil é composta de matéria orgânica, em seguida vem o papel. Reciclar o lixo custa 15 vezes mais do que depositar em lixões (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 - Composição média do lixo urbano brasileiro.

Tipo de material	Porcentagem (%)
Matéria orgânica	52,5
Papel e papelão	24,5
Plásticos	2,9
Vidros	1,6
Metais ferrosos e não ferrosos	2,3
Outros (trapos, borracha, couro, madeira, etc)	16,2
TOTAL	100

Fonte: Pereira Neto (1992).

3.1.1.1 - Características do lixo de Belém

O Brasil produz cerca de 240 mil toneladas de lixo por dia sendo 90% depositado a céu aberto e menos de 5% do lixo urbano é reciclado. Calcula-se que 30% do lixo brasileiro fique espalhado pelas ruas das grandes cidades. Na cidade de São Paulo, das 15 mil toneladas de lixo recolhidas por dia, cerca de 35% são materiais recicláveis e menos de 1% é reciclado. Cada paulistano produz diariamente 1,2 kg de lixo, em média, que vão para as montanhas dos lixões ou aterros sanitários (PMB, 1997).

O lixo da cidade de Belém é composto principalmente de matéria orgânica (58% do total) e o teor de material reciclável, papel, papelão, plásticos, metais e vidros se encontram em torno de 36%. Seus resíduos sólidos são compostos em sua grande maioria, por lixo público e lixo domiciliar (Tabela 3.2).

Tabela 3.2 - Participação percentual dos diferentes tipos de lixo da cidade de Belém.

Tipos de lixo cidade de Belém		Composição gravimétrica de lixo de Belém	
		Componentes	% peso (base úmida)
Lixo público	43,73%	Matéria orgânica	58
Lixo domiciliar	33,75	Papel e papelão	14
Lixo de feiras e mercados	3,67%	Plásticos finos e grossos	18
Lixo Industrial e comercial	0,45%	Metais	2
Lixo hospitalar	0,38%	Têxteis, couro e borracha	4
Outros	18,02%	Vidro, terra e pedra	2
		Madeira	1
		Outros	1
TOTAL	100 %	TOTAL	100%

Fonte: PMB (1997).

3.1.2 - Classificação do lixo

Para determinar a melhor tecnologia para tratamento, aproveitamento ou destinação final do lixo é necessário conhecer a sua classificação, pois o lixo possui uma complexa composição, onde atuam diversos elementos de diferentes fontes. O lixo pode ser classificado de acordo com sua natureza física, composição química, origem, riscos potenciais ao meio ambiente, entre outros fatores. Quanto a sua natureza e estado físico, o mesmo pode ser classificado em

sólido, líquido, gasoso e pastoso (Oliveira, 1997).

No que se refere ao critério de origem e produção, classifica-se da seguinte forma:

Lixo urbano: Formado por resíduos sólidos em áreas urbanas, onde se incluem os resíduos domésticos, os efluentes industriais domiciliares (pequenas indústrias de fundo de quintal) e resíduos comerciais;

Lixo domiciliar: Formado pelos resíduos sólidos de atividades residenciais, contém muita quantidade de matéria orgânica, plástico, lata, vidro, papéis, etc;

Lixo comercial: Formado pelos resíduos sólidos das áreas comerciais, compostos por matéria orgânica, papéis e plásticos de vários grupos.

Lixo público: Formado por resíduos provenientes de limpeza pública (areia, papéis, folhagem, poda de árvores);

Lixo especial: Formado por resíduos geralmente industriais, merece tratamento, manipulação e transporte especial, são eles: pilhas, baterias, embalagens de agrotóxicos, embalagens de combustíveis, de remédios ou venenos;

Lixo industrial: Nem todos os resíduos produzidos por indústria, podem ser designados como lixo industrial. Algumas indústrias do meio urbano produzem resíduos semelhantes ao doméstico, exemplo disto são as padarias; os demais poderão ser enquadrados em *lixo especial* e ter o mesmo destino;

Lixo de serviço de saúde: Os serviços hospitalares, ambulatoriais, farmácias, são geradores dos mais variados tipos de resíduos sépticos, resultados de curativos, aplicação de medicamentos que em contato com o meio ambiente ou misturado ao lixo doméstico poderão ser patógenos ou vetores de doenças. Eles devem ser destinados à incineração;

Lixo atômico: Produto resultante da queima do combustível nuclear, composto de urânio enriquecido com isótopo atômico 235. A elevada radioatividade constitui um grave perigo à saúde da população e por isso deve ser enterrado em local próprio e inacessível;

Lixo espacial: Restos provenientes dos objetos lançados pelo homem no espaço, que circulam ao redor da Terra com a velocidade de cerca de 28 mil quilômetros por hora. São estágios completos de foguetes, satélites desativados, tanques de combustível e fragmentos de aparelhos que explodiram normalmente por acidente ou foram destruídos pela ação das armas anti-satélites;

Lixo radioativo: Resíduo tóxico e venenoso formado por substâncias radioativas

resultantes do funcionamento de reatores nucleares. Como não há um lugar seguro para armazenar esse lixo radioativo, a alternativa recomendada pelos cientistas foi colocá-lo em tambores ou recipientes de concreto impermeáveis e à prova de radiação e enterrá-los em terrenos estáveis, no subsolo.

3.1.3 - Poluição pelo lixo

Dá-se o nome de poluição a qualquer degradação (deterioração, estrago) das condições ambientais do habitat de uma coletividade humana. É uma perda, mesmo que relativa, da qualidade de vida em decorrência de mudanças ambientais.

O problema da poluição, portanto, diz respeito à qualidade de vida das aglomerações humanas. A degradação do meio ambiente do homem provoca uma deterioração dessa qualidade, pois as condições ambientais são imprescindíveis para a vida, tanto no sentido biológico como no social.

O Brasil produz cerca de 240 mil toneladas de lixo por dia - número inferior ao dos EUA (607 mil t/dia), mas bem superior ao de países como a Alemanha (85 mil t/dia) e a Suécia (10,4 mil t/dia). Desse total, a maior parte vai parar nos lixões a céu aberto; apenas uma pequena porcentagem é levada para locais apropriados. Uma cidade como São Paulo, gasta por dia, 1 milhão de reais com a questão do lixo. Para o IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1995), são poucas as prefeituras do país que possuem equipes e políticas públicas específicas para o lixo. Quando ele não é tratado, constitui-se num sério problema sanitário, pois expõe as pessoas a várias doenças (diarréia, amebíase, parasitose) e contamina o solo, as águas e os lençóis freáticos.

Nos últimos anos, tem crescido também a preocupação com materiais tóxicos, como pilhas, baterias de telefone celular e pneus. Quando descartados de forma irregular, esses objetos ampliam os problemas sanitários e de contaminação. As pilhas, por exemplo, deixam vazar metais como o zinco e o mercúrio, extremamente prejudiciais à saúde. Os pneus, ao acumular água, transformam-se em focos de doenças, como a dengue e a malária. Desde julho de 1999, uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) responsabiliza os fabricantes e comerciantes pelo destino final desse tipo de produto, depois que forem descartados pelos usuários.

Segundo Oliveira (1997), as poluições física, química e biológica são os principais danos provocados pela disposição inadequada do lixo nos cursos d'água, como forma de destino final.

Podem ser classificados como forma de poluição física, o aumento da turbidez da água, a formação de bancos de lodos ou sedimentos inertes, a variação do gradiente de temperatura, etc. Na ocorrência de tais perturbações, as mesmas tendem a interferir na quebra do ciclo vital de espécies do meio aquático, tornando a água biologicamente estéril.

Apresenta-se como forma de poluição química: a mudança de coloração das águas, formação de correntes ácidas, águas duras, águas tóxicas, ocasionando o envenenamento de peixes, aves, animais diversos e o homem.

3.1.4 - Disposição e controle do lixo

Segundo IPEA (1996), no Brasil em média 99% dos resíduos gerados são dispostos sobre o solo; deste total somente 22,89% são dispostos em aterros controlados. A disposição do lixo urbano no Brasil tende a apresentar uma distribuição bastante variada no que se refere as suas formas de eliminação, devido à presença de culturas populacionais e níveis de desenvolvimento sócio-econômico regionais e municipais diferenciados (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 - Formas de disposição do lixo urbano no Brasil.

Tipo de Disposição	Porcentagem	Tipo de Disposição	Porcentagem
A céu aberto	45,78	Despejo em águas ou mangues	5,27
Aterro controlado	22,89	Estação de compostagem	4,67
Aterro sanitário	20,19	Incineração	1,2

Fonte: IPEA (1996).

O tratamento adequado do lixo envolve tanto vantagens ambientais (preservação, saúde e qualidade de vida), como econômicas. O consumo de energia e de água no processo de reciclagem do papel, por exemplo, é 50% menor que o verificado na produção do material novo.

Segundo especialistas, entre as soluções para a questão está a criação de aterros sanitários em locais adequados, a adoção de programas de coleta seletiva e reciclagem, a realização de campanhas de conscientização da sociedade e uma maior atuação dos poderes públicos.

Segundo Oliveira (1997), os aterros podem ser classificados segundo a sua forma de disposição final em:

a) aterro comum, se caracteriza pela simples descarga do lixo, sem qualquer tratamento, também denominado de lixão. Este método ainda é o mais utilizado no Brasil e nos países em desenvolvimento;

b) aterro controlado, o lixo recebe uma cobertura diária aleatória de material inerte, o que não satisfaz os problemas relacionados à poluição originada pelo lixo;

c) aterro sanitário, pode ser definido como sendo um processo para disposição de resíduos no solo, especialmente o lixo domiciliar, que utilizando normas de engenharia específicas, permite uma confinamento segura, no que diz respeito ao controle da poluição ambiental e de proteção ao meio ambiente..

A operação de aterro sanitário é uma complexa obra de engenharia, pois envolve a condição de aliar a armazenagem de lixo e resíduos, com a necessidade de proteção e conservação do meio ambiente, principalmente na preservação do ecossistema da região envolvida. Para tanto, a instalação de aterros sanitários deve ser feita em áreas criteriosamente escolhidas, levando-se em conta principalmente a condição das águas do local, devendo-se evitar a possibilidade de contaminação do lençol freático. Tal situação somente será atendida se forem observadas as condições de absorção do solo, além da correta disposição dos resíduos e do tratamento dos líquidos (chorume) oriundos do aterro (depósito).

O chamado aterro sanitário não é um processo de tratamento, pois consiste na deposição de camadas de lixo alternadas com camadas de argila em terrenos bem drenados. Nessas condições as camadas de lixo sofrem decomposição aeróbia e depois anaeróbia. Um inconveniente do aterro sanitário é a possibilidade de contaminação das águas subterrâneas, além da não reciclagem dos materiais para os locais de origem.

A incineração é um outro processo de controle, no qual o lixo é queimado em câmaras de incineração e suas cinzas podem ser usadas por indústrias de fertilizantes.

No processo de compostagem, o material orgânico do lixo sofre um tratamento biológico do qual resulta o chamado “composto”, material que pode ser utilizado na fertilização e condicionamento do solo.

3.1.5 - Processo de degradação dos resíduos sólidos

O lixo urbano é constituído predominantemente por matéria orgânica e como tal sofre intensa decomposição. A decomposição pode ser feita por dois processos: aeróbio e anaeróbio. A decomposição aeróbia é muito mais rápida e os resíduos resultantes são: gás carbônico, sais minerais e alguns compostos orgânicos que por serem mais resistentes à biodegradação, não chegam a se decompor totalmente. Já a decomposição anaeróbia, pode originar compostos que podem ser tóxicos ou exalar mau cheiro.

Todo o processo de decomposição pode ocorrer mais lentamente que o normalmente esperado e em condições de pouca umidade pode prolongar-se por décadas (Rathje³ *et al. apud* Piratoba Morales, 2002).

Segundo Santos (1991), a atividade enzimática de degradação do material orgânico biodegradável origina um líquido de cor negra, denominada de sumeiro ou chorume que, ao infiltrar-se no solo, pode atingir o lençol freático ocasionando a sua contaminação.

3.1.6 - Comportamento subterrâneo do chorume nas zonas não-saturada e saturada

A natureza do chorume produzido na área de disposição de resíduos sólidos depende da composição do lixo, do tempo em que a água infiltrada está em contato com ele e da quantidade de água que se infiltra.

Segundo Mestrinho (1994), quando um contaminante atinge o lençol freático há a formação de uma *pluma* ou *nuvem de contaminação*, que tende a migrar com a direção do fluxo subterrâneo e pode apresentar-se sob diferentes formas químicas em função das características hidrogeológicas locais e dos resíduos infiltrados.

No entanto, para que o chorume alcance o lençol freático, este deve atravessar a zona vadosa, também chamada de zona não-saturada, aqui definida como a região situada entre a superfície do terreno e o nível hidrostático, onde coexistem três fases: o material sólido poroso de origem geológica ou orgânica; a fase líquida com a água e seus solutos; e a fase gasosa constituída pelo ar, vapor d'água, N₂, CO₂, O₂, e em menores quantidades NH₃ e N₂O (Mestrinho,

³ RATHJE, W.L.; HUGHES, W.W.; ARCHER & WILSON, D.C. Source reduction and Landfill Myths, paper presented at ASTSWMO National Solid Waste Forum o Integrated Municipal Waste Management, Lake Buena Vista, FL, July 17-20, 1988.

1994). A referida zona é composta por água gravitacional (água que percola sob influência da gravidade), água pelicular e capilar (águas sem movimento, retidas por forças higroscópicas e capilares).

Esta zona merece uma atenção especial, visto que representa a primeira e mais importante defesa natural contra a contaminação das águas subterrâneas, pois os poluentes aplicados na superfície precisam percolar através dela, antes de atingirem a zona saturada abaixo do nível freático. É a zona onde há o primeiro alarme sobre a potencialidade de contaminação das águas subterrâneas e isso ocorre não somente por sua posição estratégica entre a superfície e o nível freático, como também porque seu ambiente, em termos físicos, químicos e biológicos, é geralmente mais efetivo na atenuação e eliminação de contaminantes (Foster & Hirata, 1993).

O movimento da água na zona não saturada é lento, aeróbio e descendente no regime de chuvas, facilitando a lixiviação e infiltração. Ânions como Cl^- , SO_4^{2-} e NO_3^- são facilmente lixiviados e transportados, enquanto que os cátions que se encontram geralmente na forma de sais solúveis dependem de condições de acidez, disponibilidade de íons e do tipo de ligação (Piratoba Morales, 2002). Em alguns casos, tanto o fluxo de águas subterrâneas, como o transporte de contaminantes da superfície até o nível freático tende a ser um processo lento, levando anos ou décadas para atingir a zona saturada.

Sendo assim, espera-se que a zona não-saturada desenvolva uma maior capacidade para: interceptação, sorção e eliminação de bactérias e vírus; atenuação de cargas contendo metais pesados e outros químicos inorgânicos através de precipitação, sorção ou intercâmbio de cátions, sorção e biodegradação de muitos hidrocarbonetos e compostos orgânicos sintéticos (Foster & Hirata, 1993)

No que se refere à zona saturada o processo de dispersão hidráulica, associado ao fluxo de águas subterrâneas, ocasiona a diluição dos contaminantes móveis e persistentes. Nessa zona os perfis dos solos e os condicionantes hidrogeológicos não possuem o mesmo comportamento na atenuação de contaminantes. O grau de atenuação variará amplamente segundo o tipo e o processo dos contaminantes num dado ambiente (Freeze & Cherry, 1979).

Vários processos influem no movimento do chorume, tanto na zona não-saturada, como na zona saturada, tais como: processos geoquímicos (adsorção/desorção, solubilização/precipitação, complexação/filtração) processos bioquímicos (decomposição de orgânicos e síntese celular), processos de retardação ou transformação, como a filtração e

transporte de substâncias patogênicas (Fetter, 1994). Esses processos são os responsáveis pelos fenômenos de atenuação, retardamento ou transformação dos diferentes grupos de poluentes na zona não saturada, sendo que os processos físicos e químicos imperam na zona não-saturada e fenômenos de diluição e dispersão hidrodinâmica ocorrem na zona saturada. No entanto, os processos físicos e químicos que ocorrem durante a interação com o ambiente hidrogeológico muitas vezes não são suficientes para causar uma atenuação sensível em muitas das substâncias contaminantes contidas dentro da pluma de poluição.

Os metais pesados, tais como: cádmio, cromo, estanho, mercúrio, na maioria dos aquíferos são imobilizados por precipitação e outros processos químicos. No entanto, um Eh e pH muito baixos podem vir a permitir a mobilidade destes elementos no sistema subterrâneo.

Existem parâmetros que são usados com a finalidade de se identificar o nível de influência do chorume nas águas subterrâneas, por não experimentarem atenuação e poderem ser facilmente detectados. Incluem-se entre eles os metais, os compostos orgânicos voláteis e outros elementos considerados pertinentes (Piratoba Morales, 2002).

Segundo Parisot *et al.* (1985), os parâmetros mais utilizados na identificação e delimitação de plumas de contaminação originadas por chorume são o cloreto, o sódio, a condutividade elétrica específica, o cálcio, STD, o potássio, o bário, o boro e o amônio.

Rhyner *et al.*⁴ *apud* Piratoba Morales (2002), por outro lado, especificou os parâmetros mais utilizados na detecção dos constituintes do chorume, os seus mecanismos de atenuação e a sua mobilidade nas argilas (Tabela 3.4).

⁴ RHYNER, C., SCHWARTZ, L.J.; WENGER, R.B. & KOHRELL, M.G. Waste Management and Resource Recovery. Lewis Publishers. USA, 1995.

Tabela 3.4 - Alguns constituintes do chorume, seus mecanismos de atenuação e suas mobilidades.

Constituintes do chorume	Mecanismo de Atenuação	Mobilidade em argilas
Alumínio	Precipitação	Baixa
Amônia	Troca e absorção biológica	Moderada
Arsênio	Precipitação e adsorção	Moderada
Bário	Adsorção, troca e precipitação	Baixa
Berílio	Precipitação e troca	Baixa
Boro	Adsorção e precipitação	Alta
Cádmio	Precipitação e adsorção	Moderada
Cálcio	Precipitação e troca	Alta
DQO	Absorção biológica e filtração	Moderada
Cloreto	Diluição	Alta
Cromo	Precipitação, troca e adsorção	Baixo (Cr ³⁺), alta (Cr ⁶⁺)
Cobre	Adsorção, troca e precipitação	Baixa
Cianeto	Adsorção	Alta
Fluoreto	Precipitação, troca e adsorção	Moderada
Ferro	Precipitação e troca	Baixo
Chumbo	Precipitação e troca	Baixo
Magnésio	Troca, precipitação	Moderada
Manganês	Precipitação e troca	Alta
Mercurio	Adsorção e precipitação	Alta
Níquel	Adsorção e precipitação	Moderada
Nitrato	Absorção biológica e diluição	Alta
Potássio	Adsorção e troca	Moderada
Selênio	Adsorção e troca	Moderada
Sílica	Precipitação	Moderada
Sódio	Troca	Baixo para alto
Sulfato	Troca e diluição	Alta
Vírus	Desconhecida	Baixa
Compostos orgânicos voláteis	Absorção biológica e diluição	Moderada
Zinco	Troca, adsorção e precipitação	Baixa

Fonte: Rhyner *et al.* apud Piratoba Morales (2002).

4 - TRABALHOS DE PESQUISA DESENVOLVIDOS NA ÁREA

O Estudo de Impacto Ambiental (EIA) e o Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), ambos elaborados em 1991 como requisito obrigatório para implementação e operação do Complexo de Destino Final do Resíduo Sólido da Região Metropolitana de Belém, estabeleciam que o referido complexo deveria funcionar com uma usina de incineração destinada ao lixo hospitalar, um aterro sanitário, duas lagoas de estabilização e uma usina de reciclagem e compostagem com capacidade para o beneficiamento de 600 ton./dia de lixo domiciliar e 7 ton./dia de lixo hospitalar. Este estudo ambiental ressaltou a proximidade do lençol freático à superfície do terreno na área, o que ocasionou recomendações quanto à sua impermeabilização e também à viabilização de um contínuo monitoramento ambiental e programas educacionais que enfatizassem a questão sobre o meio ambiente.

Antes da implantação do depósito de lixo, Bastos (1991) utilizou o método geofísico da eletrorresistividade, através da técnica de Sondagem Elétrica Vertical (SEV), para obter perfis que indicaram que, em caso de infiltração, o escoamento do chorume dar-se-ia em duas direções. No covão, o sentido do fluxo seria de E para W, obedecendo ao decaimento da depressão, em direção à drenagem que passa ao lado da área, caracterizado como o segundo afluente do rio Aurá, pelo seu lado direito. No setor noroeste do depósito, o fluxo dar-se-ia no sentido Sul, em direção ao rio Aurá.

Ribeiro (1992) correlacionou dados físicos, físico-químicos, bioquímicos, hidrobiológicos e geoquímicos sobre a avaliação da qualidade das águas consumidas pela Região Metropolitana de Belém através dos lagos Água Preta e Bolonha. Sob o ponto de vista químico/geoquímico/biogequímico a autora acrescenta que os parâmetros e análises utilizados em seu estudo evidenciaram que os mananciais do Utinga estão sofrendo crescente processo de degradação ambiental e que, apesar da acentuação do avanço urbano sobre os referidos lagos, o uso da água ainda é permissível, visto que considerou a capacidade autodepuradora dos mesmos, mas o tratamento para melhorar sua qualidade a cada dia se torna mais oneroso.

Sauma Filho (1996) avaliou as águas subterrâneas utilizadas na Região Metropolitana de Belém, correlacionando dados de parâmetros físicos, físico-químicos e químicos e verificou a influência que essas águas sofrem das unidades geológicas do Quaternário, do Grupo Barreiras e da Formação Pirabas. Em seus resultados destacou a existência de uma estreita relação entre o pH

(proximidades de 7) e a condutividade elétrica (entre 231 e 362 $\mu\text{S}/\text{cm}$) na identificação dos aquíferos Pirabas e que o mesmo apresenta teores mais elevados de eletrólitos fortes (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^-) em relação aos demais aquíferos.

Oliveira (1997), ao analisar a presença de metais pesados nos arredores do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém, detectou valores que indicavam a contaminação do ambiente por chumbo (Pb), zinco (Zn), mercúrio (Hg), cromo (Cr), níquel (Ni) e cádmio (Cd), sendo que este último elemento apresentou altas concentrações (valores médios de 2,0 ppm), seguido do mercúrio com teores acima do valor aceitável como normal em áreas não contaminadas (34,5 ppm).

Oliveira (1998) estabeleceu que a falta de critérios técnico na implantação do Depósito de Lixo do Aurá associada ao excedente hídrico característico da região, propiciaram a infiltração da água através dos resíduos e a geração de chorume em quantidades ainda não determinadas. O lixiviado, por não ser coletado, nem tratado adequadamente se constitui uma séria ameaça à qualidade dos solos e das águas superficiais e subterrâneas da área. O fato dos resíduos sólidos serem depositados sobre sedimentos arenosos, possibilita a infiltração do lixiviado que atinge facilmente o lençol freático, uma vez que este comumente se encontra a uma profundidade inferior a 1 metro. O autor ressalta que o comprometimento do aquífero freático é mais marcante à 120 metros à oeste do depósito, em uma várzea. A contaminação é evidenciada pelos altos teores de amônia (máximo 2,72 mg/L) e de condutividade elétrica (máximo de 2860 $\mu\text{S}/\text{cm}$), assim como pelo pH básico (máximo de 7,48), contrastando com as características da água dotada como padrão da área. Os valores mais elevados foram obtidos no final do período seco. Nessa época, normalmente espera-se uma tendência de redução do volume de chorume produzido, devido à diminuição na infiltração das águas pluviais através do depósito de lixo. No entanto, devido à menor diluição da água do aquífero nessa época, a mesma em geral tende a apresentar-se mais concentrada em eletrólitos, justificando os elevados valores anteriormente referidos.

Menezes (2000) identificou que os níveis estáticos das águas subterrâneas do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém nos locais de cotas mais baixas, encontram-se muito próximo à superfície, cerca de 0,50 m, variando conforme a estação climática do ano, já que este nível sofre influência direta das águas pluviais. Foi observado que existe uma relevante relação entre o nível estático e as condições pluviométricas, visto que foram verificadas elevações

significantes de valores de níveis estáticos no período chuvoso, ocorrendo um decréscimo no período de estiagem. Ao analisar a profundidade (20 m) apresentada pela maioria dos poços utilizados no monitoramento foi possível verificar que o aquífero presente nestes poços pertence ao Grupo Barreiras, visto que esta formação atinge na região de Belém uma profundidade de aproximadamente 100 metros. A semelhança estratigráfica na área, a qual foi analisada através dos perfis de poços construídos nas adjacências do depósito (zonas Norte e Sul), juntamente com os esquemas tridimensionais desenvolvidos para facilitar a visualização do comportamento das camadas do terreno, permitiram que o mesmo constatasse que há a predominância de um aquífero livre, o qual apresenta-se em alguns locais como aquífero confinado. Ao analisar o mapa de equipotenciais hidráulicos traçado para o referido estudo, o autor afirma que o fluxo das águas subterrâneas ocorre no sentido norte para o sul, em direção aos igarapés.

Carneiro & Geraldo (2000) em seus estudos sobre a determinação de clorofila e a avaliação de produtividade nos lagos Água Preta e Bolonha, ressaltaram que a problemática do Utinga existe em decorrência da urbanização crescente e desordenada que se verifica nos municípios de Belém e Ananindeua, mais precisamente no estreito corredor ao longo da BR-316, levando ao surgimento de bairros, conjuntos residenciais e a multiplicação de favelas. Nesses locais encontram-se as principais nascentes das bacias hidrográficas dos Lagos Bolonha e Água Preta e algumas dessas nascentes já se encontram fora de áreas físico-territoriais pertencentes à COSANPA e, portanto, sujeitas à degradação de suas proximidades. A falta de uma coleta de lixo eficiente e uma campanha de conscientização de preservação do meio ambiente, contribuíram para aumentar o problema do sistema hídrico dos lagos que são cercados por alguns conjuntos habitacionais que acumulam lixo e há uma proliferação de insetos e roedores. A falta de saneamento dos locais próximos ao reservatório contribuem para a degradação dos mesmos, pois, atualmente, há um despejo de efluentes domésticos e de algumas fossas de casas nas valas indo em direção aos reservatórios de água. Os valores obtidos de clorofila com o referido estudo demonstraram que há uma grande atividade fitoplanctônica nos lagos e com uma análise mais profunda desses valores pode-se chegar à conclusão que os mesmos tendem à hipertrofização. Os autores concluem que a falta de uma política de saneamento para as áreas ao redor dos lagos Água Preta e Bolonha e considerando a intensa multiplicação de plantas aquáticas às proximidades, sujeitas à maior contaminação oriunda da lixiviação de terrenos ocupados pelo avanço urbano, sugere um possível aumento de nutrientes, caracterizando um contínuo aumento

no processo de degradação dos lagos.

Piratoba Morales (2002) expõe em sua pesquisa que os recursos ambientais da área de abrangência do depósito de resíduos sólidos do Aurá estão sendo atingidos pelos poluentes originados na sua degradação e suas condições elétricas do terreno foram drasticamente afetadas após a área ter sido transformada em depósito de lixo. Através dos resultados analíticos dos principais parâmetros traçadores de chorume em amostras de águas subterrâneas, complementados com estudos de eletroresistividade. Piratoba Morales (2002), propõe que os resíduos sólidos depositados na área tem originado uma pluma de contaminação que se desloca especialmente na direção sul à uma velocidade de 14,79 m/ano, contaminando os aquíferos que apresentam conexão mediante camadas altamente permeáveis que afloram na área onde estão depositados os resíduos sólidos. Ao analisar o comportamento inversamente proporcional existente entre a concentração dos principais parâmetros traçadores de chorume e a altura da maré, o autor ressalta a evidência que os fluxos de chorume atingem com maior intensidade os recursos hídricos na baixa-mar. De acordo com o estudo, os sedimentos da área de abrangência estão sendo poluídos principalmente por metais como chumbo, zinco e manganês, moderadamente poluídos por cobre, níquel e cádmio e não sofrem interferência de poluição por cromo. Através da análise dos resultados obtidos no ponto de captação da COSANPA no rio Guamá para os lagos Água Preta e Bolonha, o citado autor não constatou se esses mananciais superficiais estão sendo atingidos pelo deslocamento superficial do chorume, havendo a possibilidade dos parâmetros traçadores de chorume estarem sofrendo atenuação por fatores biológicos, químicos e físicos, especialmente pelo fenômeno de diluição. O referido autor estabeleceu que os principais problemas ambientais detectados na área de abrangência do depósito de resíduos sólidos do Aurá são os causados pelo deslocamento superficial e subterrâneo de chorume que está atingindo os recursos hídricos da área e identificou espacialmente as áreas mais vulneráveis a serem atingidas pela infiltração de chorume, como aquelas onde o lençol freático encontra-se a menos de 50 cm de profundidade, aquelas onde afloram as camadas arenosas e aquelas ocupadas por lixo. O autor considera como áreas mais vulneráveis para serem atingidas pelo deslocamento de chorume as que se localizam nas cotas topográficas menores que 6 metros.

5 - METODOLOGIA

No desenvolvimento do presente estudo, foram realizados trabalhos de campo e de laboratório. Apresenta-se a seguir os conceitos básicos sobre as técnicas usadas nos referidos trabalhos e a descrição destes.

5.1 - TRABALHO DE CAMPO

5.1.1 - Método Eletromagnético (EM)

Atualmente, uma das metodologias mais utilizadas para detectar e monitorar fluxos de contaminantes são os métodos geofísicos, sendo os mais empregados, os métodos elétricos e eletromagnéticos através das técnicas de Sondagem Elétrica Vertical, Caminhamento Elétrico, Caminhamento de Potencial Espontâneo e Caminhamento Eletromagnético (Costa *et al.*⁵ *apud* Piratoba Morales, 2002).

O fundamento do método EM é baseado nas Leis de Maxwell, onde um campo magnético primário gerado por uma fonte eletromagnética alternada (transmissor) induz correntes secundárias em materiais condutivos da terra. Essas correntes secundárias geram campos magnéticos secundários. As respostas EM são medidas através de indução em uma bobina receptora e expressas usualmente como campos resultantes da interação entre o campo primário e o secundário, como campos secundários ou como impedâncias, dependendo da frequência, da condutividade da estrutura e da geometria de acoplamento entre transmissor e receptor.

Os métodos EM possuem técnicas variadas. No entanto, cada uma funciona unicamente envolvendo a medida em um receptor, de uma ou mais componentes do campo elétrico ou do campo magnético, a qual é gerada a partir de alguma fonte natural ou artificial de energia eletromagnética, chamada de transmissor (Swift⁶ *apud* Silva, 2002).

Na tomada de medidas com o método EM um transmissor, geralmente uma bobina transmissora emite ao subsolo um campo eletromagnético produzido por uma corrente alternada de frequência definida. Uma outra bobina receptora, numa certa distância afastada do

⁵ COSTA, A.L.; ZANINI, L.F.; DIAS, N.L. & CORREA, O. 1992. Metodologia Geofísica para detecção de contaminação de águas subterrâneas: caso do lixão da estrada da Palha. Ciência e Tecnologia. 24-37p.

⁶ SWIFT, Jr. C. M. 1987. Fundamentals of the Eletromagnetic Method. In: Nabighian, M.N. ed. Eletromagnetic methods in applied geophysics. Tuesa. SHE. V. I. P. 5-10

transmissor, recebe um campo eletromagnético induzido, que é uma superposição do campo primário (H_p) do transmissor com o campo magnético secundário (H_s), induzido em um condutor no subsolo segundo a lei de Faraday.

As configurações de arranjos entre o transmissor e o receptor são selecionadas dependendo do tipo de aplicação, seja para perfilagem horizontal (medidas da variação lateral de resistividade através da superfície) e/ou para sondagem (medidas da variação de resistividade com a profundidade).

As perfilagens horizontais são realizadas deslocando-se lateralmente o transmissor e o receptor, mantidos a uma separação constante.

As sondagens EM (SEM) consistem em medidas com um certo número de frequências ou durante um intervalo de tempo usando fonte e receptor fixos. A distribuição de corrente induzida na terra depende da condutividade elétrica e da permeabilidade magnética do subsolo e da frequência da corrente no transmissor (correntes de baixa frequência alcançam maiores profundidades que correntes de alta frequência). Medidas de resposta EM em várias frequências ou para vários valores de tempo, contêm informações da variação da condutividade com a profundidade. As sondagens também podem ser realizadas, medindo-se a resposta em várias separações de fonte-receptor em uma única frequência ou tempo. Portanto, um conjunto de tais medidas feitas utilizando muitos espaçamentos, contém informações da variação da condutividade com a profundidade.

5.1.1.1 - Sistema Slingram

Este sistema é um dos mais empregados métodos EM, consistindo de um dipolo transmissor e um dipolo receptor, em que as componentes em-fase e quadratura do campo magnético vertical secundário são medidos para uma dada frequência. Apresenta diferentes arranjos de bobinas, no entanto o mais utilizado é o arranjo denominado de método HLEM (Horizontal Loop Eletromagnetic), que recebe este nome devido utilizar tanto a bobina transmissora como a receptora no plano horizontal. A Figura 5.1 ilustra uma resposta HLEM considerada típica, em que um corpo condutivo vertical se encontra em contato com uma rocha encaixante menos condutiva.

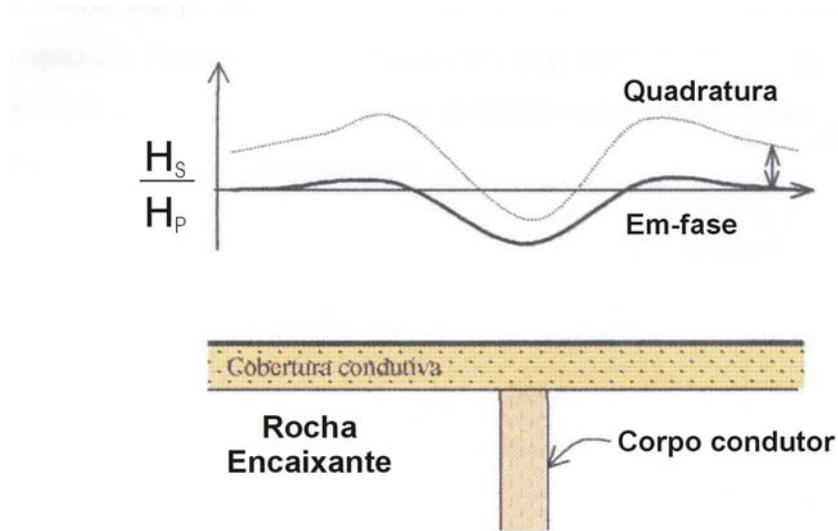


Figura 5.1 - Perfil HLEM sobre um corpo condutor (H_s = campo secundário; H_p = campo primário) (Silva, 2002).

Durante a operação uma corrente oscilante de frequência conhecida e pré-determinada passa a circular na bobina transmissora. A mesma produzirá um campo magnético primário, que induzirá força eletromotriz e, conseqüentemente, corrente em corpos condutores existentes na subsuperfície. O campo secundário, por sua vez, induzirá uma voltagem oscilante na bobina receptora que alcança o seu máximo num tempo diferente daquele em que o máximo do campo primário é alcançado. Por isso, os campos primário e secundário são ditos estarem fora de fase (Silva, 2002).

A voltagem induzida pelo campo secundário é separada em duas componentes durante a sua medida na bobina receptora: uma que se encontra em fase com o campo primário (componente em fase ou componente real) e uma segunda que se encontra um quarto de período fora de fase (componente fora de fase, componente em quadratura ou componente imaginária). As medidas do campo secundário são tomadas como percentagem do campo primário gerado no transmissor, o qual é transmitido ao receptor via cabo ou por telemetria. A modificação do campo eletromagnético, medido no receptor em relação ao campo primário, depende da distribuição das condutividades elétricas dos diferentes meios na subsuperfície do terreno.

No presente estudo, foram executados 5 perfis, onde se utilizou o Sistema Slingram de Loop Horizontal Coplanar (HLEM). Para as medidas foi utilizado o instrumento APEX MAX MIN II, que permite amostragem nas frequências 110, 220, 440, 880, 1760, 3520, 7040 e 14080

Hz. As oito frequências permitem a investigação na vertical (SEM) e a sua combinação com a perfilagem horizontal (investigação lateral) permite a obtenção de uma imagem da subsuperfície abaixo dos perfis.

A distância entre as bobinas transmissora e receptora foi de 50m e de 25m o intervalo entre os pontos de medidas para todos os perfis, pois esses valores oferecem uma boa resolução vertical para os objetivos deste estudo.

As medidas eletromagnéticas utilizando o Sistema Slingram foram efetuadas em Agosto/2002. Elas foram realizadas uma única vez no sentido A-B, em locais previamente selecionados, de modo que abrangesse a maior parte da área de estudo e fornecesse informações relevantes quanto à área. Foram realizados perfis medindo 575m, 525m, 450m, 650m, 250m de comprimento. No processamento e representação das informações, foram utilizados os programas computacionais Grapher e Surfer. A localização dos perfis encontra-se ilustrada na Figura 5.2.

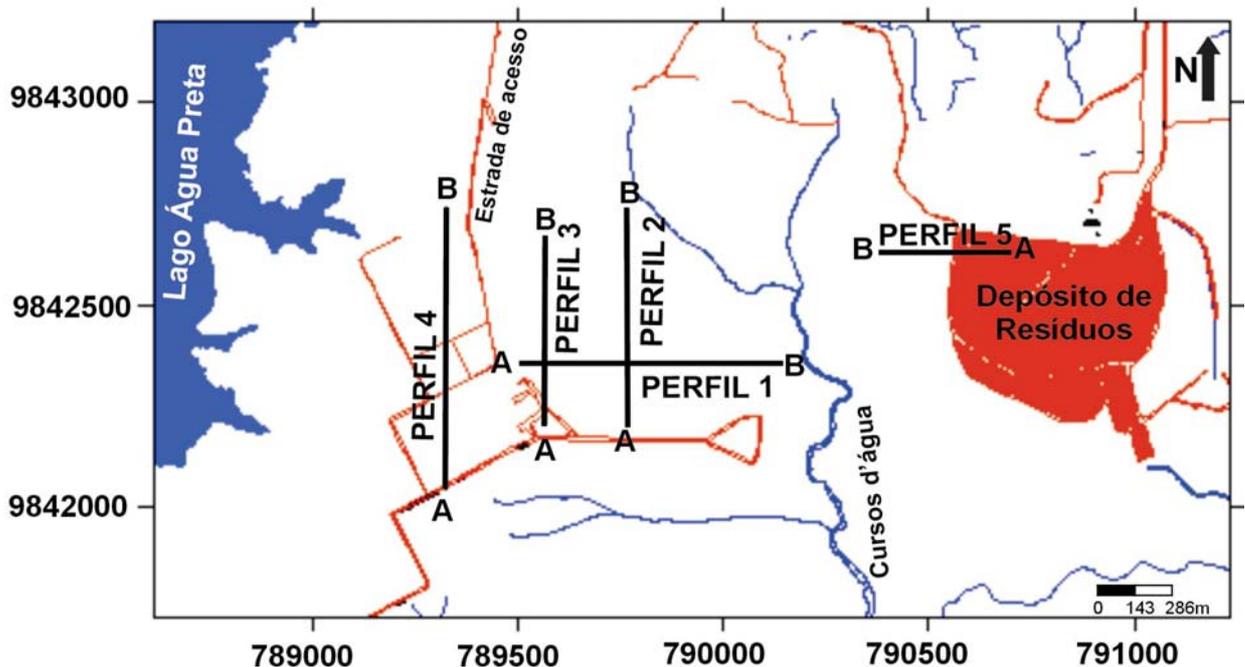


Figura 5.2 - Localização dos perfis eletromagnéticos na área de estudo.

5.1.2 - Determinação de gradiente hidráulico ($\Delta h / L$)

O gradiente hidráulico corresponde à razão entre as variações de carga hidráulica e comprimento percorrido na direção do fluxo; fisicamente mede a inclinação da superfície da água subterrânea.

O gradiente hidráulico é calculado a partir de levantamento topográfico do terreno e da medida da profundidade do nível estático em dois poços de referência e da distância existente entre eles.

Os dados do levantamento topográfico e da profundidade do nível freático são usados para calcular a cota topográfica do nível estático. De posse desse valor efetua-se o cálculo do gradiente hidráulico através da expressão matemática:

$$i = \frac{\Delta h}{L} = \frac{h_1 - h_2}{L} \quad (5.1)$$

Sendo:

i = gradiente hidráulico,

$\Delta h/L$ = gradiente hidráulico,

h_1 = carga hidráulica no poço de referência 1 (cota do nível estático),

h_2 = carga hidráulica no poço de referência 2 (cota do nível estático),

L = distância entre o poço de referência 1 e o poço de referência 2.

5.1.3 - Trabalho topográfico

A topografia dos poços de monitoramento foi obtida mediante a utilização de um nível Nikon e uma régua limnimétrica (Fig. 5.3).

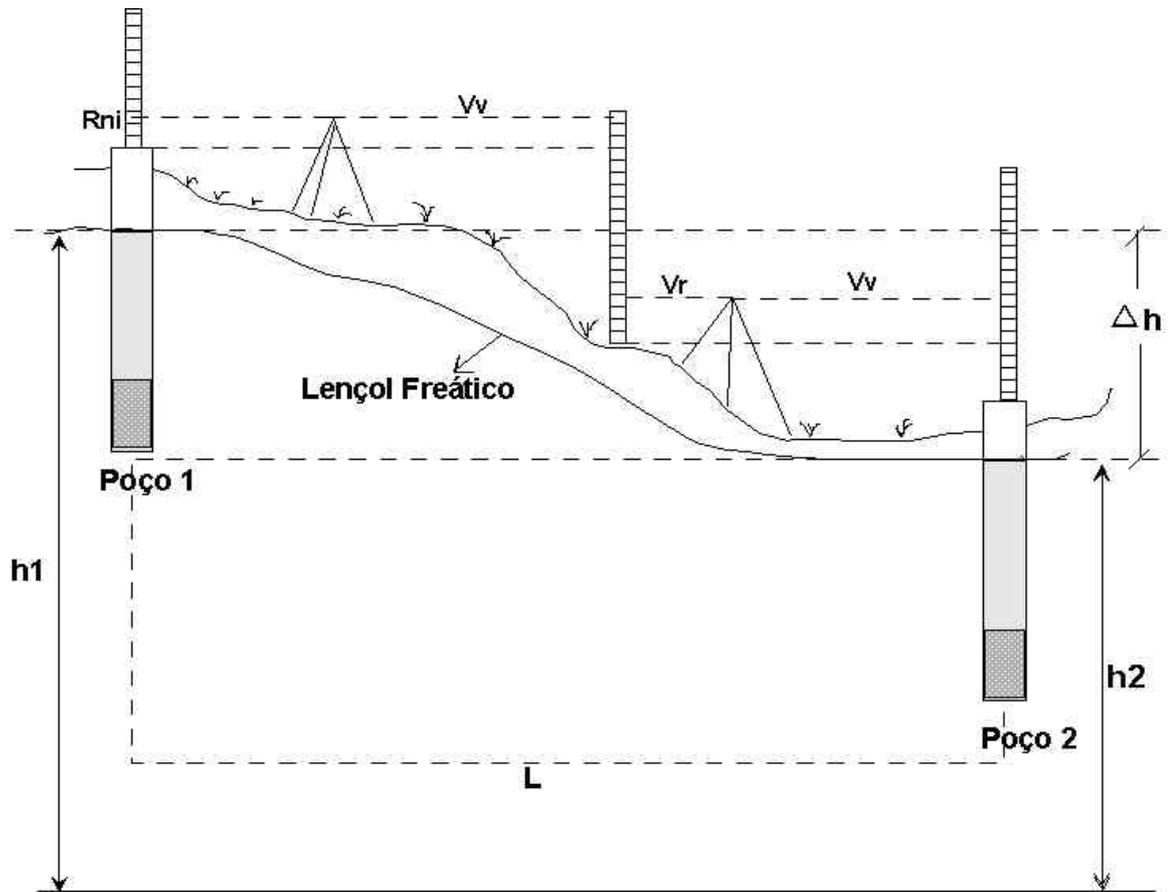


Figura 5.3 - Ilustração gráfica da metodologia utilizada na determinação da elevação topográfica de dois poços de observação.

Através da Equação 5.2 pode-se obter a diferença de nível topográfico entre a boca dos poços de monitoramento localizados na área de estudo.

$$Elev = Rni - VvAc + VrAc \quad (5.2)$$

5.1.4 - Condutividade hidráulica (K)

A habilidade da água mover-se através de um material em particular é chamada de condutividade hidráulica desse material. A condutividade hidráulica é uma função das propriedades do fluido (tal como viscosidade e densidade) e das propriedades do material (tal como diâmetro das partículas, tamanho dos poros e como eles estão interconectados).

5.1.4.1 - Determinação da condutividade hidráulica (K) através da análise de granulometria

Segundo Fetter (1994), a condutividade hidráulica de sedimentos arenosos pode ser obtida através do método de Hazen, que utiliza uma curva de distribuição granulométrica.

No entanto, este método somente pode ser utilizado, no caso do tamanho dos grãos se encontrarem dentro do intervalo compreendido entre 0,1 e 3,0 mm.

Assim:

$$K = C(d_{10})^2 \quad (5.3)$$

Sendo:

K = condutividade hidráulica

d_{10} = tamanho efetivo dos grãos (cm)

C = coeficiente baseado em valores de acordo com as condições de Fetter (1994), conforme Tabela 5.2.

Tabela 5.1 - Valores do coeficiente C.

Valor de C	Tipo de areia
40 – 80	Areia muito fina e mal selecionada
60 – 80	Areia fina com apreciável quantidade de argila
80 – 120	Areia fina bem selecionada
120 – 150	Areia grossa bem selecionada e limpa

Fonte: Fetter (1994).

5.1.4.2 - Ensaio de bombeamento para se determinar a condutividade hidráulica (K)

O ensaio de bombeamento se tornou um método eficiente para se obter os parâmetros de condutividade hidráulica (K), transmissividade (T) e coeficiente de armazenamento (S). Com os valores obtidos nos ensaios, há possibilidade de compará-los com os valores obtidos a partir da análise granulométrica.

Foram realizados ensaios de bombeamento em cinco poços de monitoramento existentes na área de estudo, a fim de se obter os valores referente à condutividade hidráulica e transmissividade (vazão da água que escoar através de uma área unitária por um metro de camada

saturada quando o gradiente hidráulico é igual a 1).

A equação de Jacob (1966) estabelece que ao se bombear um poço instalado em um aquífero de espessura saturada conhecida (b), com uma vazão constante (Q), pode se obter o valor da transmissividade (T) e através deste valor obter-se o valor da condutividade hidráulica (K).

Os dados obtidos com a execução dos ensaios de bombeamento, foram inseridos e tratados no programa computacional Aquifer Test.

5.1.5 - Velocidade Real e Aparente dos fluxos subterrâneos

Do ponto de vista teórico, as forças de movimento dos fluxos ou força hidráulica é a soma da elevação da água e a razão entre a pressão do fluido pelo peso da coluna de água.

A descarga (Q) da água subterrânea pode ser definida como o produto da área da seção transversal ao fluxo (A), o gradiente hidráulico (I) e a condutividade hidráulica (K) ou $Q = K.I.A$ (Equação 5.4) em que Q representa uma taxa de fluxo volumétrico (por exemplo m^3/dia).

$$T = K * b \quad (5.4)$$

Sendo:

T = Coeficiente de Transmissividade

b = espessura saturada do aquífero

K = Condutividade Hidráulica

Esta experiência explicou o comportamento do fluxo laminar na zona saturada e passou a ser conhecida como Lei de Darcy. Dividindo-se ambos os membros da Equação 5.4 e substituindo-se a expressão do gradiente hidráulico (Equação 5.1), chega-se à Equação 5.5.

$$V = K \frac{\Delta H}{\Delta X} \quad (5.5)$$

Sendo:

V = velocidade aparente de escoamento,

K = condutividade hidráulica,

$\frac{\Delta H}{\Delta X}$ = gradiente hidráulico.

A velocidade real de escoamento do fluxo de água subterrânea pode ser determinada com a modificação da referida lei em função da porosidade do meio, o que permitiria calcular o deslocamento de poluentes com maior mobilidade geoquímica através das águas subterrâneas (Fetter, 1994) (Equação 5.6).

$$V_r = \frac{V}{\eta} \quad (5.6)$$

Sendo:

V_r = velocidade real,

η = porosidade efetiva,

V = velocidade aparente.

5.1.6 - Instalação de poços de monitoramento

A determinação da localização dos poços de monitoramento, foi baseada nos resultados obtidos com o estudo geofísico eletromagnético que indicaram zonas com alterações em sua condutividade que foram relacionadas a variações litológicas (Figura 5.4).

Na construção dos mesmos, foram seguidas as normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT (1997). Na metodologia de perfuração utilizou-se um trado mecânico com 100 mm de diâmetro acoplado a um sistema de hastes com até 14 metros de comprimento para a perfuração; os furos de 100 mm de diâmetro foram revestidos com tubos de PVC rígido de 50 mm, cujas bocas ficaram a 70 cm acima da superfície do terreno. O nível de profundidade de cada poço foi determinado pela profundidade do lençol freático e os filtros foram instalados na espessura total do aquífero.

Durante a perfuração, foram coletadas amostras de sedimentos a cada metro ou de acordo com mudanças litológicas, objetivando a construção dos perfis litológicos dos furos e as análises hidrogeológicas. Na seção basal da tubulação foi instalada uma seção filtrante utilizando-se tela de nylon de 1 mm, enquanto o espaço anular entre o tubo de 50 mm e o furo de 100 mm foi preenchido com areia de granulometria selecionada na faixa saturada constituindo o pré-filtro; acima do mesmo foi colocado um selo de betonita para impedir a infiltração vertical da água. A parte superior do espaço anular entre o tubo e a perfuração foi preenchida com material de escavação com 30% de bentonita até a profundidade de 50 cm; acima da superfície do terreno foi construída uma base de cimento de cerca de 5 cm de espessura.

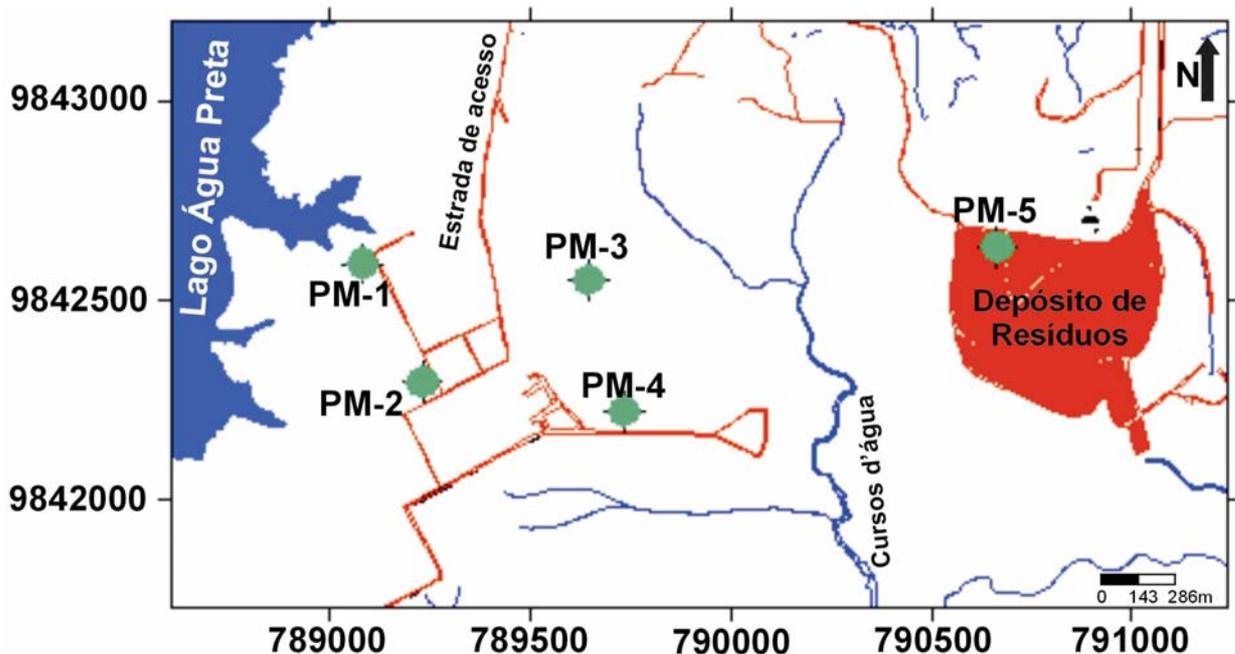


Figura 5.4 - Localização dos poços de monitoramento na área de estudo.

5.1.7 - Ensaio de permeabilidade

Para este ensaio utilizou-se o método denominado “slug-test” (ABGE, 1996), também usado para estimar a condutividade hidráulica (K) na zona saturada. O slug-test foi escolhido por se tratar de um método relativamente barato, fácil de ser usado e por poder fornecer informações valiosas sobre a condutividade hidráulica. Seu procedimento se baseia na escolha de um dos poços de monitoramento, cuja profundidade do nível estático é verificada antecipadamente e

posteriormente introduz-se uma carga (água) dentro do mesmo, a partir de então, é feito o acompanhamento do rebaixamento do nível em função do tempo, o que permite uma avaliação da permeabilidade média das camadas ao redor do filtro.

De posse dos dados obtidos, pode-se calcular a condutividade hidráulica através da equação abaixo, mediante a utilização do programa computacional Aquifer Test.

$$Kh = \frac{(rc)^2}{2LT_0} \ln \frac{mL}{rs} \quad (5.7)$$

Sendo:

rc = raio de tubulação do poço

L = comprimento do filtro

$m = \sqrt{K_h / K_v}$ relação de permeabilidade vertical e horizontal

r_s = raio do furo

T_o = tempo de resposta básico correspondente a $\Delta H = 0,37 * \Delta H_o$

Kh = condutividade hidráulica horizontal

5.1.8 - Medição de níveis estáticos nos poços de monitoramento

A determinação dos níveis estáticos nos poços de monitoramento visa fundamentalmente a análise do comportamento do lençol freático, mediante oscilações hidrometeorológicas durante o decorrer de um determinado período.

As medições da variação de profundidade das águas subterrâneas foram obtidas quinzenalmente usando-se um medidor de nível com sinal eletro-sonoro.

5.1.9 - Coleta de amostras

5.1.9.1 - Amostragem de águas subterrâneas

A coleta de água subterrânea através dos poços de monitoramento, ocorreu após os mesmos sofrerem um bombeamento prévio, a fim de se garantir a retirada de no mínimo 3 a 4 vezes o volume da coluna de água. Para a coleta utilizou-se um amostrador de PVC e frascos de

armazenamento com volumes apropriados.

5.1.9.2 - Amostragem de sedimentos

As amostras foram obtidas durante a perfuração dos poços de monitoramento (PM-1, PM-2, PM-3, PM-4 e PM-5) na área de estudo. Tais amostras foram retiradas a cada metro ou levando-se em consideração as mudanças litológicas ocorrentes. Depois de recolhidas, as amostras foram devidamente armazenadas em sacos plásticos, identificadas quanto à sua profundidade e transportadas até o laboratório.

5.1.9.3 - Parâmetros físico-químicos medidos em campo

Na área de estudo foram feitas as medidas de pH e condutividade elétrica ou condutância específica nas águas retiradas dos poços de monitoramento. Utilizou-se um medidor de pH da marca Hanna, modelo 8316 e a condutividade elétrica foi determinada por um medidor de campo marca Hanna modelo 3366, os quais foram previamente calibrados antes de serem utilizados.

5.2 - TRABALHO DE LABORATÓRIO

5.2.1 - Caracterização granulométrica

Através da metodologia do Laboratório de Sedimentologia do CPGG (Figura 5.5) foi possível se determinar o conteúdo de argila, silte e areia presente nas amostras retiradas dos poços de monitoramento PM-1, PM-2, PM-3, PM-4 e PM-5.

De posse dos dados obtidos com a referida metodologia, foram construídas computacionalmente curvas de caracterização granulométrica (Tabela 5.3), através da plotagem dos tamanhos dos grãos com uma frequência acumulada, o que permitiu posteriormente estimar o valor da condutividade hidráulica pelo método de Hazen (Equação 5.8).

$$K = C.(d_{10})^2 \quad (5.8)$$

Sendo:

K = Condutividade Hidráulica,

d_{10} = Tamanho efetivo do Grão (mm),

C = Coeficiente baseado em Fetter (1994).

Tabela 5.2 - Classificação granulométrica dos sedimentos e tamanho das peneiras.

Intervalo (mm)	Descrição	Peneiras usadas (mm)	
<0,063	Fração argila	>2,000	0,500 – 0,350
0,063-0,125	Areia muito fina	2,00 -1,410	0,350 – 0,250
0,125-0,250	Areia fina	1,410 - 1,000	0,250 – 0,177
0,250-0,500	Areia média	1,000 - 0,710	0,177 -0,082
0,500-1,00	Areia grossa	0,710 -0,500	0,082 – 0,062
			< 0,062

Fonte: Krumbein & Pettijohn⁷ apud Piratoba Morales (2002).

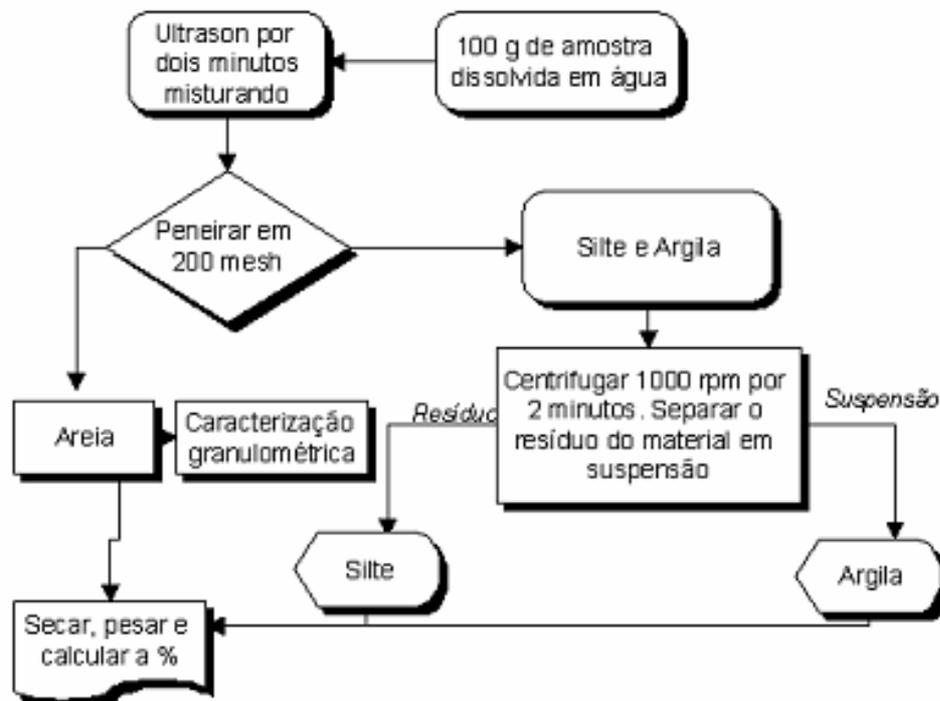


Figura 5.5 - Diagrama de fluxo para a determinação de silte, areia e argila em sedimentos e amostras de solo, conforme procedimentos seguidos no Laboratório de Sedimentologia da Universidade Federal do Pará.

⁷ KRUMBEIN, W. C. & PETTIJOHN. 1938. Manual of sedimentary petrography. Appleton - Century-rofts, Inc., New York, 549p.

5.2.2 - Determinação da porosidade (η)

A taxa de acúmulo da água subterrânea depende da natureza e extensão da porosidade primária e secundária nos solos ou rochas. A porosidade é justamente a quantidade em volume de poros vazios ou cheios (líquidos) nos solos e nas rochas. Dá-se o nome de porosidade de uma rocha à relação existente entre o volume dos poros e o volume total, relação esta expressa em percentagem ou fração decimal.

O ensaio de porosidade foi realizado utilizando-se amostras, referentes a mesma profundidade, de calha dos poços construídos no local de estudo utilizando-se o método do picnômetro e através de amostras indeformadas coletadas com cilindro metálico (testemunhos).

Para as amostras de calha utilizou-se em laboratório dois picnômetros, previamente aferidos, que após serem preenchidos com as devidas amostras, foram devidamente pesados. Após tal procedimento, em cada picnômetro foi adicionado água até a saturação completa das amostras e novamente pesado. De posse dos valores obtidos com os respectivos volumes, determinou-se a porosidade de todas as amostras selecionadas mediante a Equação 5.9.

$$\eta = \frac{V_v}{V_t} * 100 \quad (5.9)$$

Sendo:

V_v = volume de vazios,

V_t = volume total.

Para as amostras não deformadas, um volume conhecido foi submerso em água durante 12 horas. Posteriormente a amostra foi pesada e colocada em estufa a 105°C durante 24 horas, resfriada e pesada novamente (Equação 5.10).

$$V_t = P_t - P_r \quad (5.10)$$

Sendo:

P_t = peso total da amostra saturada com água

P_r = peso real da amostra após 24 horas na estufa a 105°C

V_t = volume total da amostra

5.2.3 - Análises químicas em águas subterrâneas

Foi realizada uma campanha de coleta de amostras de água subterrânea em todos os cinco poços de monitoramento, ocorrida no mês de Outubro/2002, visando analisar os parâmetros considerados como traçadores de chorume. Tais análises foram de extrema importância para posterior identificação de pontos indicadores da presença do chorume.

5.2.3.1- Parâmetros físico-químicos:

- **Potencial de hidrogênio (pH):** As medidas foram efetuadas na área de estudo e em laboratório conforme recomendações de Aminot & Chaussepied (1983).

- **Condutividade elétrica:** Medidas em campo com equipamento previamente calibrado com água de mar padrão (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980).

- **Alcalinidade total:** Determinado segundo o método volumétrico (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980; Baumgarten *et al*, 1996).

- **Oxigênio Consumido:** Obtido pela oxidação da matéria orgânica mediante a redução do permanganato de potássio em meio ácido (CETESB, 1978b).

5.2.3.2 - Parâmetros químicos

- **Sódio (Na^+), Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Potássio (K^+):** Espectrometria de Emissão Atômica Seqüencial por Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-AES), com visualização Radial do Plasma cobrindo uma faixa espectral de 189 a 940 nm.

- **Cloreto (Cl^-)**: Determinado pelo método volumétrico, utilizando nitrato de prata ou nitrato de mercúrio (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980).
- **Sulfato (SO_4^{2-})**: Determinado pelo método turbidimétrico (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980).
- **Nitrato (NO_3^-)**: Estimado pelo método de redução quantitativa (> 95%) (Aminot & Chaussepied, 1983).
- **Nitrito (NO_2^-)**: Determinado pelo método de Bendschneider & Robinson (Aminot & Chaussepied, 1983).
- **Nitrogênio amoniacal (NH_4^+)**: Calculado pelo método azul de indofenol (Aminot & Chaussepied, 1983).
- **Ferro (Fe)**: Determinado por espectrofotometria (método da fenantrolina) (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980).
- **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**: obtido pelo método da oxidação de dicromato de potássio em meio ácido, (*Standard Methods* APHA-AWWA-WPCF, 1980).

Os dados de análise da água com relação a sua qualidade natural foram interpretados com base no Diagrama Triangular de Piper, visto que o mesmo qualifica uma água com base em análises individuais ou num conjunto de dados de diferentes pontos amostrados em uma área ou num aquífero em particular.

Assim sendo, a análise da água pode ser comparada e interpretada usando-se técnicas gráficas para descrever a concentração ou abundância relativa dos constituintes maiores e menores. É um método útil que permite não somente indicar a qualidade da água para determinado uso, mas também para ilustrar as variações na qualidade, enfatizar diferenças e similaridades ou ainda para ajudar a detectar e identificar alguns dos processos químicos.

O Diagrama Triangular de Piper (Figura 5.6) é frequentemente usado para classificar

o tipo químico da água subterrânea de acordo com a espécie predominante e, também para definir a sua evolução química. Neste diagrama pode-se distinguir três campos com os dados plotados em % meq/L: o triângulo dos cátions, onde é plotada a abundância relativa dos cátions $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$; o triângulo dos ânions Cl^{2+} , SO_4^{2-} e $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ e o losângulo onde os pontos encontrados nos triângulos anteriores são projetados. O cruzamento do prolongamento dos dois pontos define a posição do ponto na área do losângulo e classifica a amostra de acordo com seus fácies para cátions e ânions (Mestrinho, 1994).

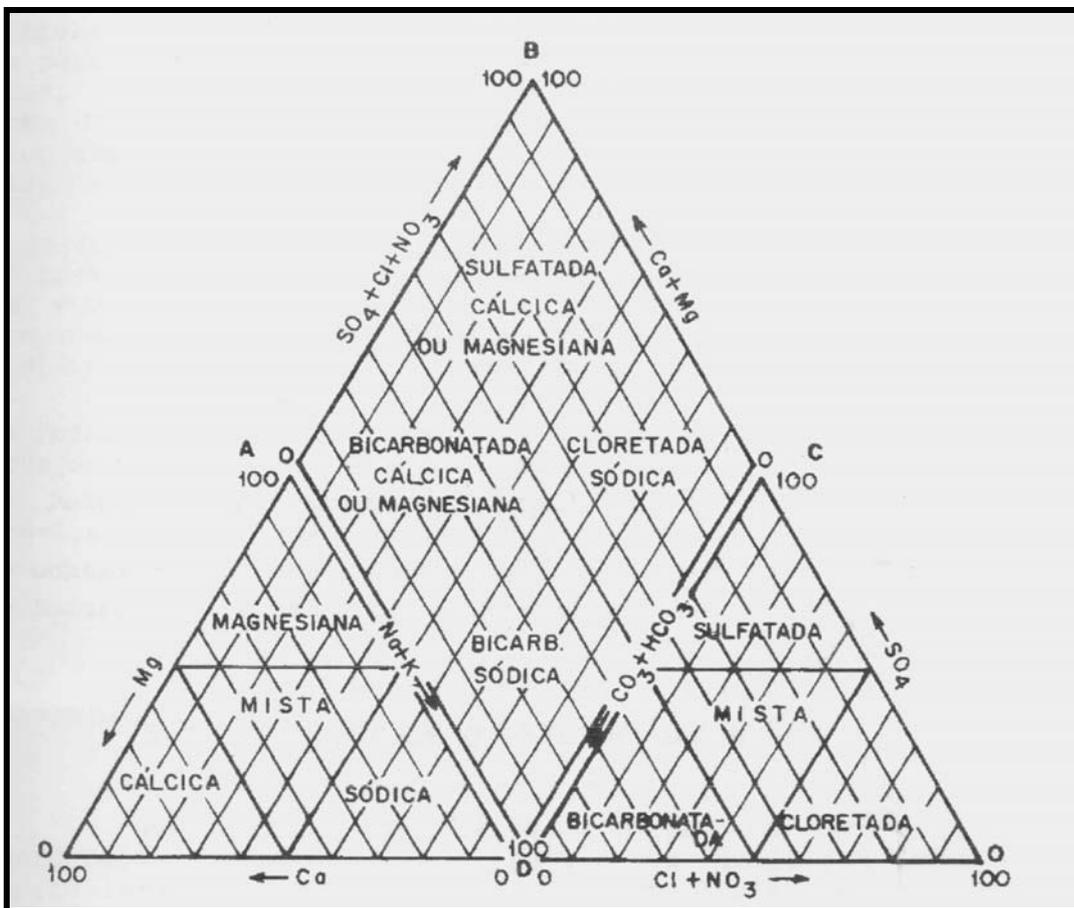


Figura 5.6 - Diagrama Triangular de Piper (Mestrinho, 1994).

6 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1 - ESTUDOS GEOFÍSICOS

6.1.1 - Medidas Eletromagnéticas (EM)

Os métodos geofísicos elétricos e eletromagnéticos são os mais utilizados na detecção e monitoramento de poluição de águas subterrâneas. Os métodos eletromagnéticos, entretanto, oferecem sobre os métodos elétricos a vantagem de serem mais rápidos e fáceis de aplicar. Estes métodos não detectam camadas altamente resistivas entre seqüências de camadas condutivas e são muito sensíveis a ruídos culturais (linhas de transmissão, cercas, dutos metálicos, etc). Além disso, os métodos eletromagnéticos requerem pouco espaço no terreno para a execução de uma sondagem, contornando assim um dos problemas logísticos impostos pelo método eletroresistivo que consiste na expansão lateral dos eletrodos no terreno.

As vantagens dos métodos eletromagnéticos acima descritos, levaram-nos a optar por ele no presente estudo, que consistiu de 5 caminhamentos (perfis) com o Sistema Slingram MaxMin, usado com o arranjo de bobinas segundo a configuração coplanar horizontal.

Durante as medidas, as bobinas transmissora e receptora foram mantidas à separação constante de 50m (Tx–Rx: 50m), enquanto o espaçamento de amostragem foi de 25m. Em cada estação foram medidas as componentes em fase e quadratura do campo magnético secundário como percentagem do campo primário. As frequências utilizadas nas medidas foram: 110 Hz, 220 Hz, 440 Hz, 880 Hz, 1760 Hz, 3520 Hz, 7040 Hz e 14080 Hz.

Os valores medidos para as componentes em fase e quadratura foram representados na forma de perfis, com as posições de medida na horizontal e os valores das componentes no eixo vertical. Essa representação permite que se visualize variações laterais e se identifiquem eixos de condutores localizados na subsuperfície.

Além disso, as componentes em-fase e quadratura foram combinados através da fórmula:

$$Z = \sqrt{F^2 + Q^2} \quad (6.1)$$

Sendo Z o módulo do campo, F o valor da componente em fase e Q o valor da componente em quadratura.

O valor de Z adquirido, foi então representado de modo a se obter a sua variação com a frequência. Para isso, em cada posição de medida, os valores de Z foram colocados em um eixo vertical e a seguir correlacionados lateralmente, traçando-se contornos de isovalores. Esse tipo de representação permite visualizar o comportamento do ambiente geológico na direção vertical, abaixo das posições de medida, uma vez que a profundidade de investigação depende da frequência (frequências mais altas estão relacionadas com uma menor profundidade e frequências mais baixas com maiores profundidades). Essa representação equivale, portanto, a uma sondagem vertical da subsuperfície e segundo Silva (2002), os valores maiores de Z são associados às zonas mais condutoras da subsuperfície, por exemplo as zonas argilosas.

Abaixo se apresenta uma descrição dos perfis e medidas obtidos nos 5 caminhamentos e sua interpretação.

a) Perfil 1

Os valores medidos ao longo deste perfil estão representados na Figura 6.1 (valores das componentes em fase e quadratura do campo magnético) e Figura 6.2 (contorno de isovalores do módulo de campo). Ambas as formas de representação mostram a distância percorrida de 600 metros no sentido oeste-leste para o perfil, que termina no Igarapé Santo Antônio.

A representação da Figura 6.1 permitiu a identificação de 5 eixos condutores cuja localização é mostrada por setas na figura.

O eixo identificado na posição 100m da Figura 6.1 é bem evidenciado na representação mostrada na Figura 6.2, pela zona condutora entre as posições 75m e 125m, que ocorre em todas as frequências. É possível que tal condutividade esteja relacionada a mudanças litológicas (material argiloso) em subsuperfície ou à presença de água.

Os outros eixos condutores evidenciados na Figura 6.1 (posições 225, 350, 400 e 525m) não parecem estender-se a grandes profundidades, conforme indica a representação mostrada na Figura 6.2. Os condutores a eles associados parecem ser essencialmente superficiais e podem ser devidos a solo mais úmido e/ou argiloso. O condutor localizado na posição 525m pode também ser devido à influência antrópica, o que acarretou alterações nos valores obtidos para esta estação.

É possível que o contorno de isovalor 20 mostrado na Figura 6.2, possa ser correlacionado ao topo dos sedimentos lateríticos menos condutivos do Grupo Barreiras. Nesse caso, os valores de contorno maiores que 20 estariam associados a sedimentos mais condutivos, provavelmente do Pós-Barreiras.

A representação mostrada na Figura 6.2, ao ser correlacionada com os sedimentos da subsuperfície, proporciona uma imagem geológica aparente da subsuperfície. A imagem é considerada aparente, devido a mesma não apresentar uma escala de profundidade definida.

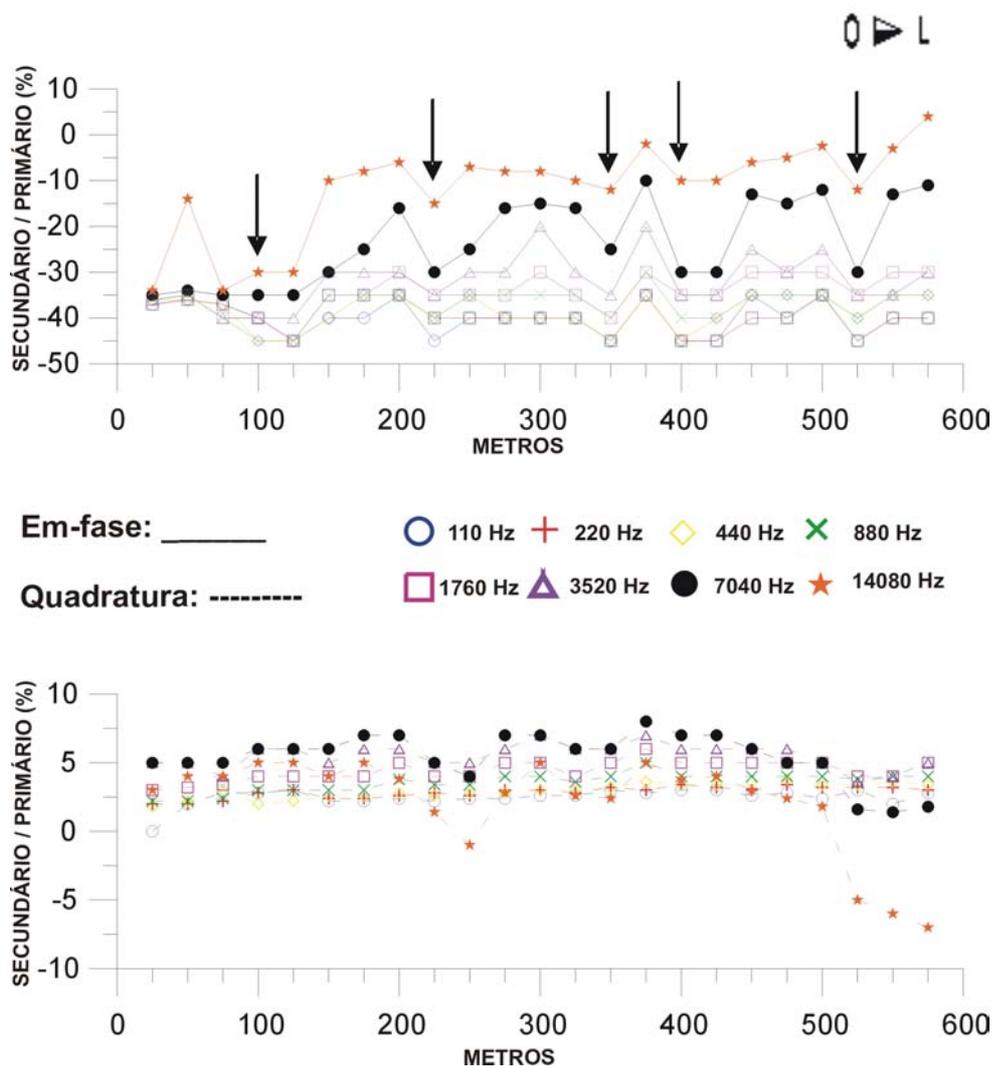


Figura 6.1 - Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 1.

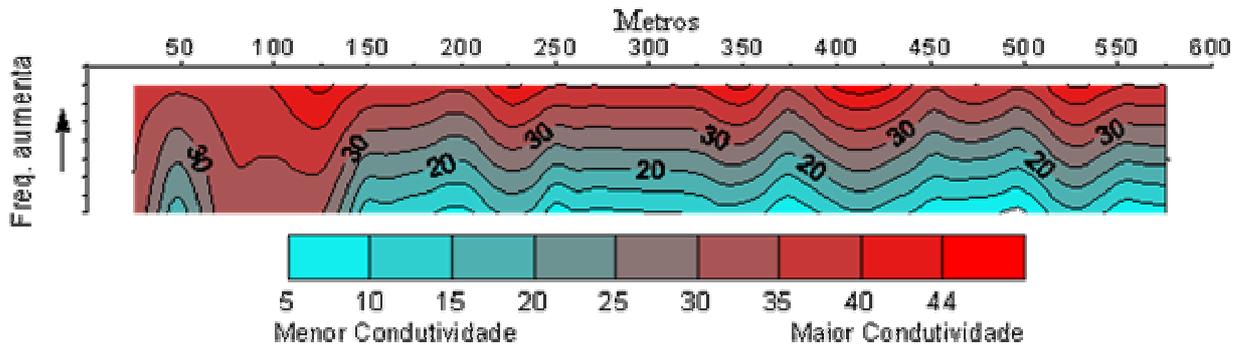


Figura 6.2 - Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 1.

b) Perfil 2

O perfil 2 foi realizado no sentido S-N, cruza o perfil 1 e cobre uma distância de 525m. Este perfil foi interrompido aos 525m devido a presença de uma torre de alta tensão, que influenciou nas medidas coletadas a partir desta posição.

As observações geológicas de superfície ao longo deste perfil permitiram identificar a presença de um terreno bastante argiloso e úmido no decorrer de todo o seu percurso.

As Figuras 6.3 e 6.4 mostram respectivamente as respostas obtidas para as componentes em-fase e quadratura e do módulo do campo.

Os valores das componentes em-fase e quadratura mostrados na Figura 6.3 permitiram a identificação de 3 eixos condutores. Esses eixos, embora sejam bem evidentes em todas frequências, as condutividades a eles associada são maiores para as frequências mais altas, conforme indica a representação da Figura 6.4. É provável que eles sejam devidos a presença de água no solo, que neste perfil estava bem evidenciada superficialmente.

O eixo condutor localizado na posição 350m parece ser o que se estende a maior profundidade, conforme sugere a representação da Figura 6.4.

Considerando o contorno de isovalor 20 como o limite da zona laterítica do Grupo Barreiras, o perfil pode ser usado como uma imagem aparente da subsuperfície, conforme descrito anteriormente.

c) Perfil 3 (área do Exército)

Este caminhamento foi realizado no sentido S-N, paralelo ao perfil 2, e cobriu a extensão de 450m. O perfil, à semelhança do perfil 2 foi interrompido na torre de alta tensão. As medidas obtidas neste perfil encontram-se representadas nas Figuras 6.5 e 6.6.

Quatro eixos de condutores podem ser identificados na Figura 6.5. Desses, a comparação com a representação do módulo de campo na Figura 5.6, indica que os eixos localizados nas posições 175m e 375m associam-se a corpos condutores que se estendem a maiores profundidades. Como anteriormente, a Figura 6.6 mostra uma imagem geológica aparente onde o topo do Grupo Barreiras se delineia através do contorno de valor 20.

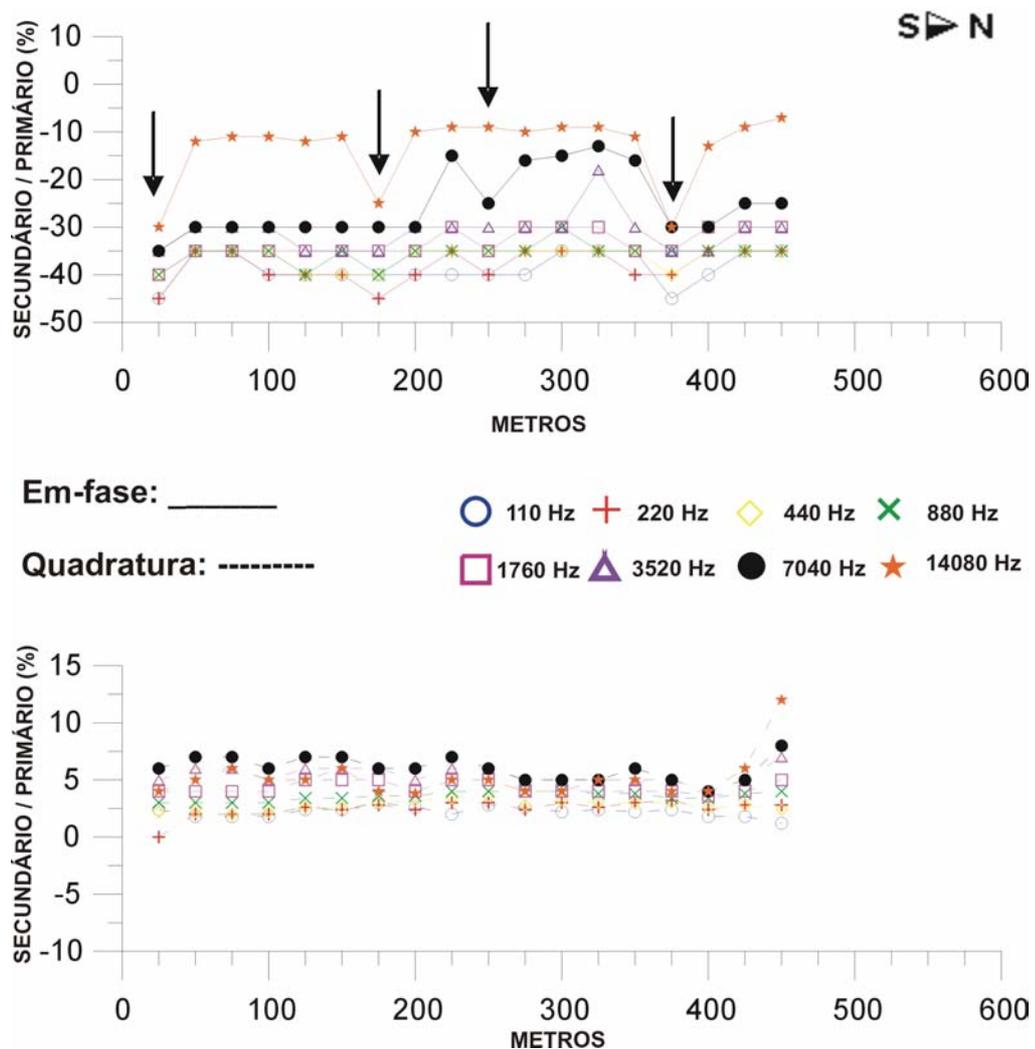


Figura 6.5 - Valores dos componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 3.

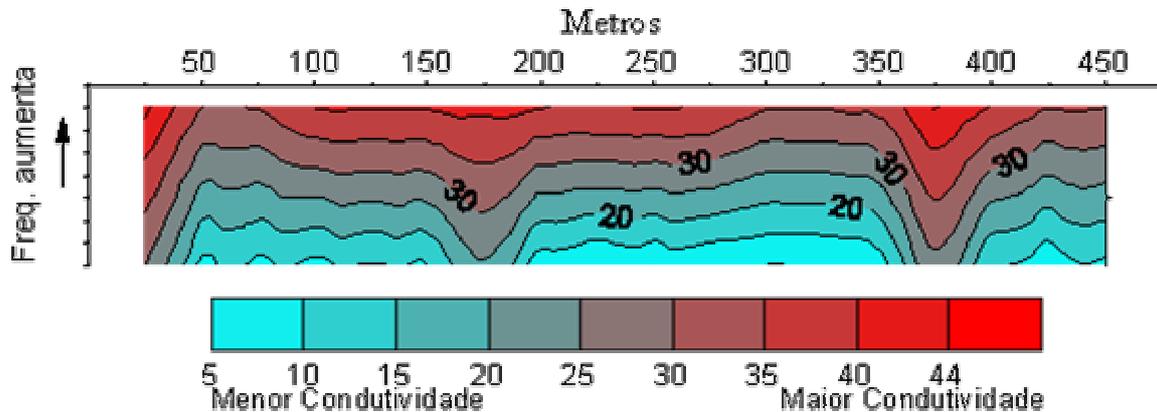


Figura 6.6 - Contornos de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 3.

d) Perfil 4 (área da EMBRAPA)

Este é o perfil mais à oeste da área estudada e foi realizado em área pertencente à EMBRAPA. O perfil se inicia próximo à estrada de acesso e tem 650m de extensão em direção ao Norte. Os valores medidos são apresentados na forma de perfis das componentes em-fase e quadratura do campo magnético (Figura 6.7) e módulo do campo (Figura 6.8).

Na Figura 6.7 é possível identificar-se 5 eixos de condutores. A comparação com a Figura 5.8 indica que os condutores associados aos eixos localizados nas posições 125m e 375m estendem-se a profundidades maiores que os outros.

Ainda na Figura 6.7, verifica-se que no intervalo entre as estações 25m e 100m do perfil, as curvas apresentam um comportamento anômalo caracterizado por diversas oscilações. Possivelmente, isto se deve à presença nesta área de várias interferências antrópicas, como uma linha de transmissão e cercas de arame que a delimitam.

A representação da Figura 6.8 indica que as zonas mais condutoras estendem-se a profundidades menores do que nos outros perfis. Nas posições entre 550m e 650m, por exemplo, há um predomínio de material mais resistivo próximo à superfície do terreno.

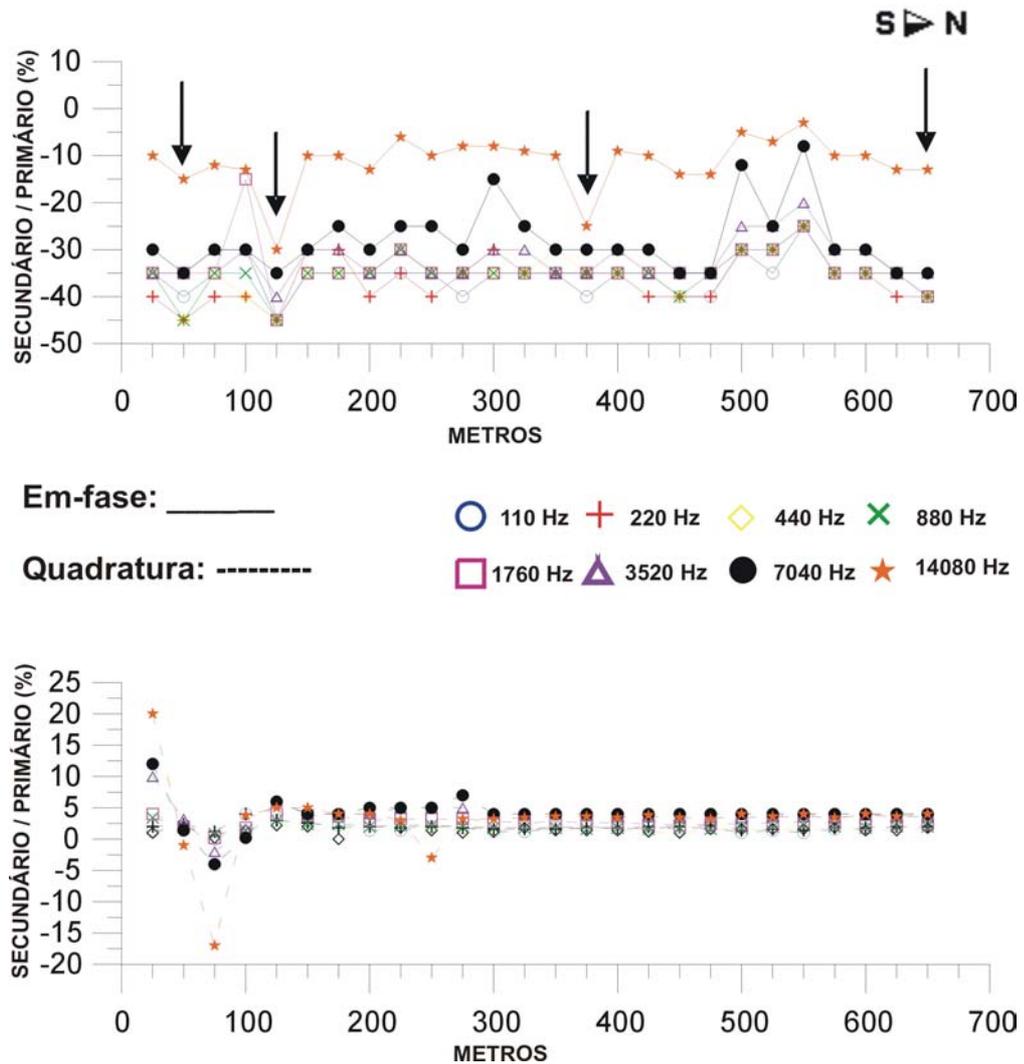


Figura 6.7 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 4.

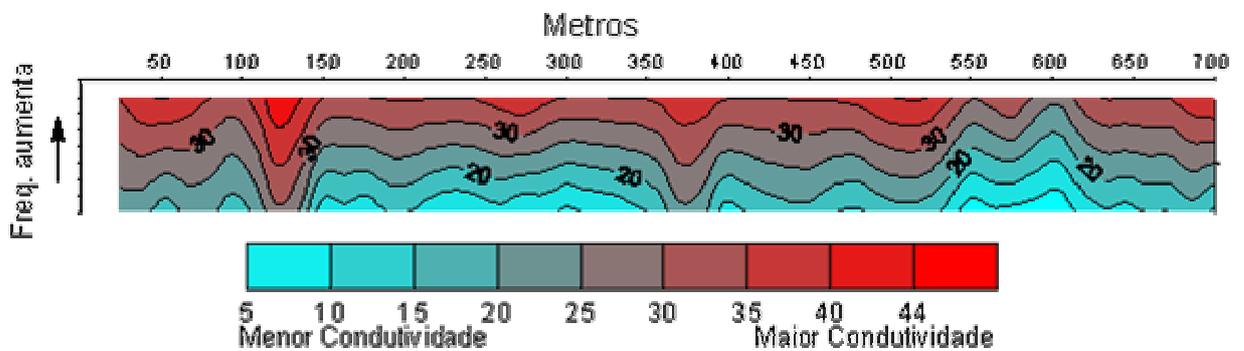


Figura 6.8 - Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 4.

e) Perfil 5 (Depósito de Resíduos Sólidos)

Este é o caminhamento localizado mais a leste da área de estudo, mais precisamente na área de Depósito de Resíduos Sólidos de Belém.

Os valores obtidos ao longo deste caminhamento estão representados na Figura 6.9 (componentes em fase e quadratura do campo magnético) e Figura 6.10 (módulo do campo).

As observações feitas ao longo deste perfil permitiram estabelecer apenas um eixo de condutor na estação 75m (Figura 6.9). O eixo é bem evidente em todas as frequências (Figura 6.10) e a análise em conjunto com os litotipos e as condições do ambiente (depósito de resíduos), sugere que ele pode estar associado provavelmente à presença de água e/ou chorume.

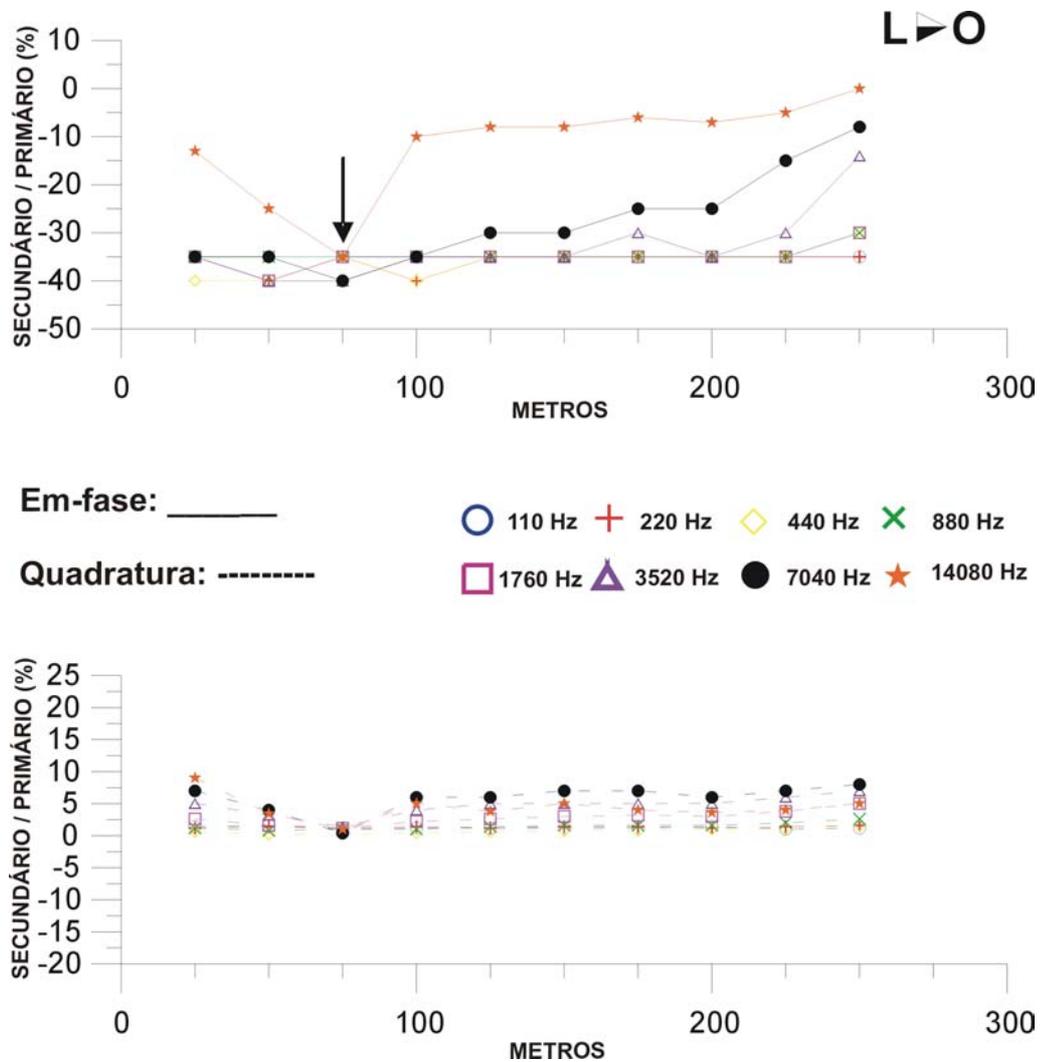


Figura 6.9 - Valores das componentes em-fase e quadratura do campo magnético secundário para o Perfil 5.

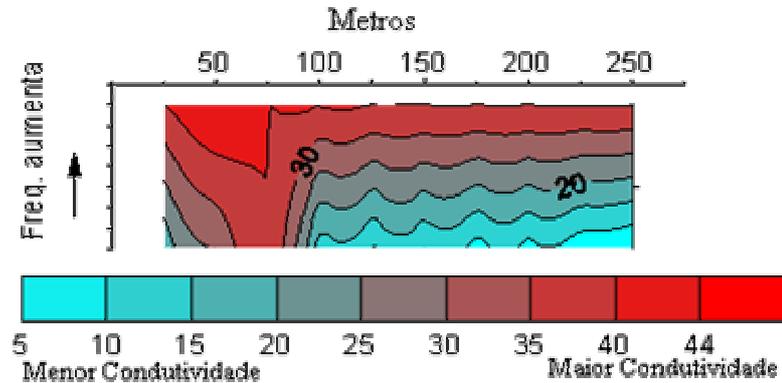


Figura 6.10 - Contorno de isovalores do módulo do campo magnético (Z) contra a frequência para o Perfil 5.

6.2 - CARACTERÍSTICAS HIDROGEOLÓGICAS DA ÁREA

6.2.1 - Instalação de poços de monitoramento

Os poços de monitoramento foram construídos com base nas normas NBR 13895/1997 da ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). Foram instalados 5 poços de monitoramento, cujos perfis litológicos e técnicos são apresentados nas Figuras 6.11 a 6.13.

O poço PM-1 (Figura 6.11), possui uma profundidade de 20m, seu perfil litológico apresenta na parte superior uma camada de 2m de argila arenosa marrom esverdeada, apresentando uma similaridade com os poços de monitoramento 2 e 4. Em seguida há uma camada de aproximadamente 9m de argila variegada com concreções ferruginosas associada ao Grupo Barreiras. Devido esta camada se encontrar acima de uma camada de 2m de areia média avermelhada a mesma passa a atuar como uma camada selante e protetora. Logo em seguida há uma outra camada de 6m composta de argila cinza esbranquiçada com tons avermelhados. Na parte inferior ocorre uma camada de 1m de areia fina acinzentada.

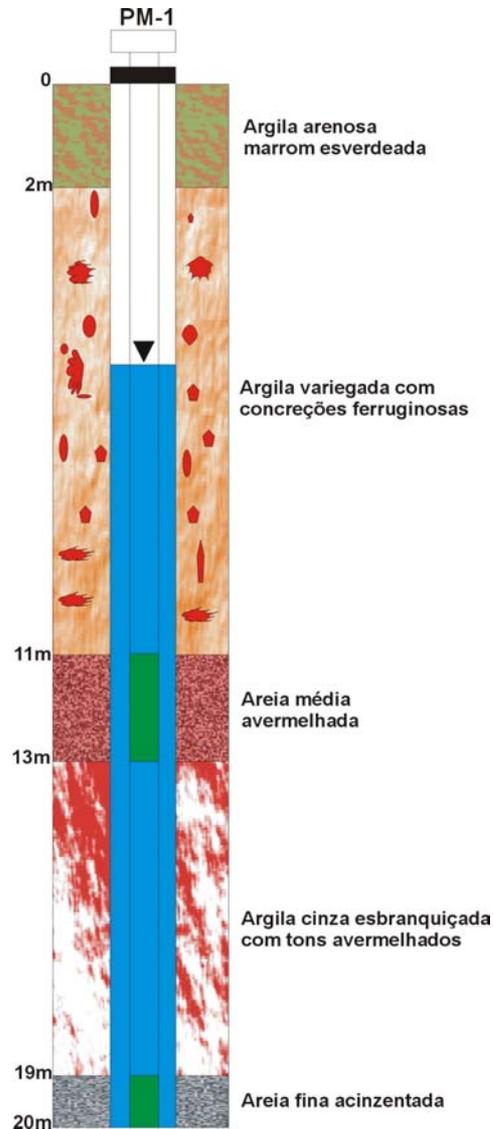


Figura 6.11 - Perfil litológico do poço de monitoramento PM-1.

O perfil litológico do poço PM-2 (Figura 6.12), apresenta uma camada inicial de 3m de argila arenosa marrom esverdeada, seguida de uma camada espessa de 12m de argila variegada com concreções ferruginosas, terminando com uma faixa de 3m de areia média avermelhada.

O perfil litológico do poço PM-3 (Figura 6.12), apresenta em grande parte de seu transcurso, características diferenciadas relacionadas aos demais poços. Quase todo o perfil do poço é formado por argilas de coloração avermelhada, branca avermelhada e esbranquiçada. Precisamente 1m antes do final deste perfil, surgiu uma camada de areia média avermelhada.

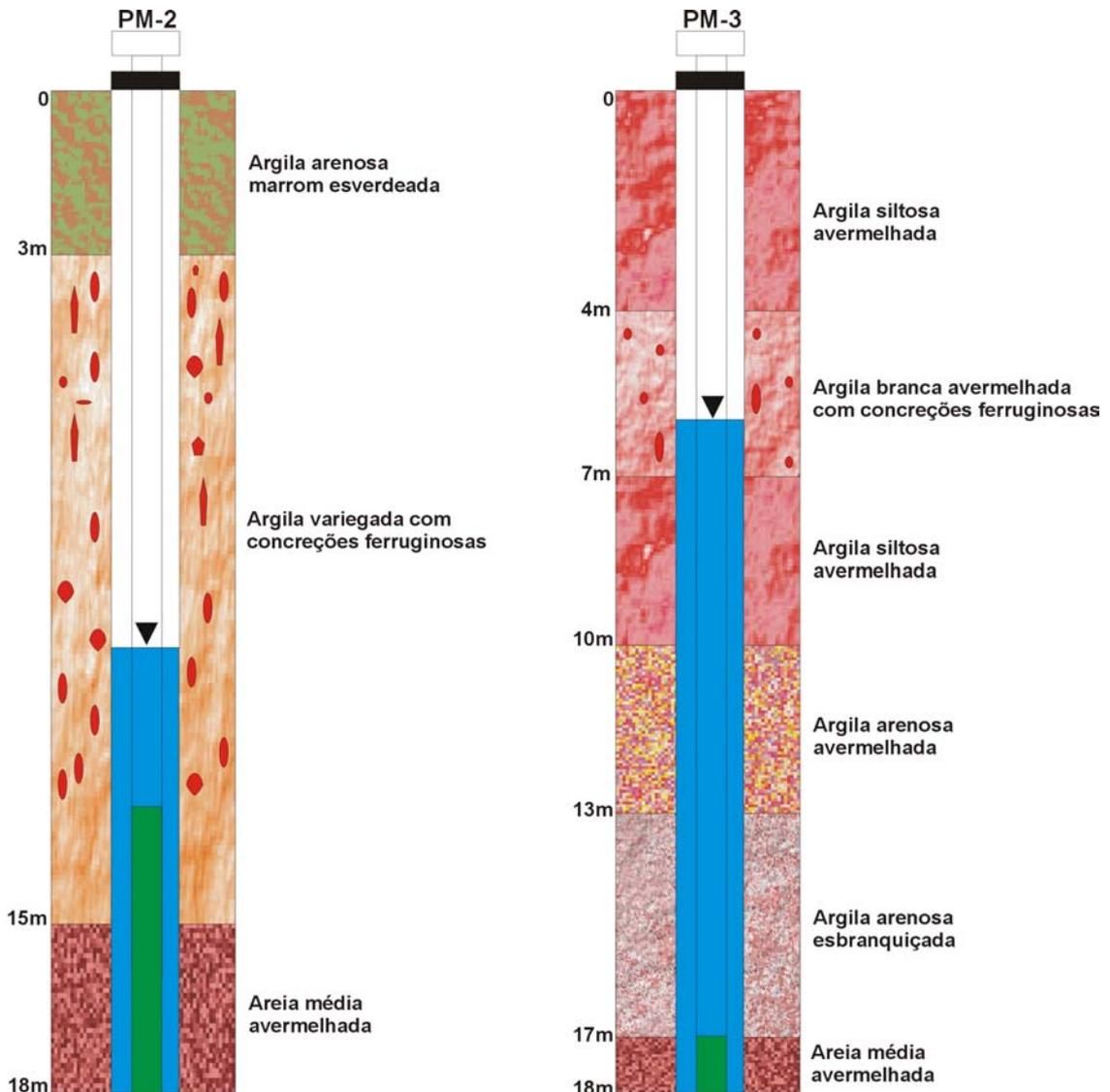


Figura 6.12 - Perfil litológico dos poços de monitoramento PM-2 e PM-3.

O perfil litológico do poço PM-4 (Figura 6.13), apresenta semelhança com os perfis PM-1 e PM-2, em especial pela presença na parte superior de uma camada de argila arenosa marrom esverdeada, que nos três poços variou de 2 a 4m.

O perfil litológico do poço PM-5 (Figura 6.13), é formado inicialmente por 4m argila arenosa creme, seguida de uma camada de 3m de areia avermelhada. Em seguida, são encontradas camadas finas (1m) de argila siltosa avermelhada com concreções e areia média avermelhada. A parte basal contém 9m de argila siltosa avermelhada com concreções.

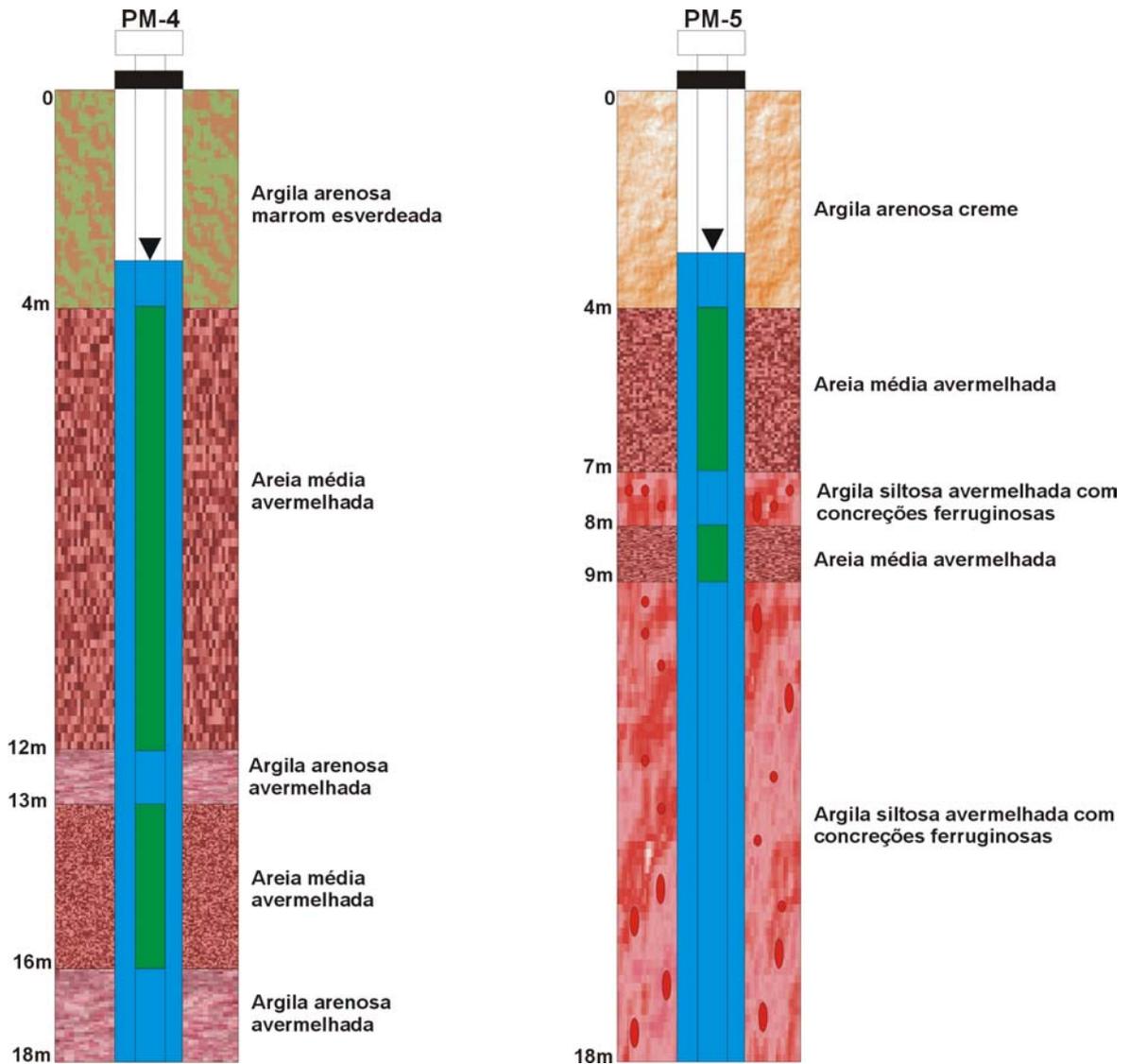


Figura 6.13 - Perfil litológico dos poços de monitoramento PM-4 e PM-5.

6.2.2 - Comportamento do lençol freático

Através dos dados obtidos com o levantamento topográfico e localização dos poços de monitoramento, foi possível determinar que a diferença existente entre o poço de monitoramento localizado na cota mais alta (PM-5) e o poço de monitoramento localizado na cota mais baixa (PM-3), encontra-se em 11,89m.

No presente estudo, executou-se 10 medidas de nível estático em cada dos cinco

poços de monitoramento, entre os meses de julho e dezembro de 2002 (Tabela 6.1), sendo associados os dados obtidos no mês de outubro ao período seco e os do mês de dezembro como período chuvoso, visto que são os que representam menor e maior precipitação, respectivamente dentro do período de medidas.

Percebeu-se que a variação da profundidade do lençol freático em todos os poços de monitoramento apresentou um comportamento atípico, pois não indicou nenhuma influência pela precipitação pluviométrica, o que indica que os mesmos se comportam como área de recarga das águas subterrâneas e que provavelmente estão sofrendo influência de dois poços pertencentes ao Exército que são bombeados periodicamente.

Tabela 6.1 – Topografia (cotas) e variações dos níveis estáticos (m) dos poços de monitoramento.

Período	Nível Estático (m)				
	PM-1	PM-2	PM-3	PM-4	PM-5
Jul/2002	5,40	10,12	6,00	3,00	3,20
Ago/2002	5,40	10,12	6,00	3,00	3,20
Ago/2002	5,27	10,12	6,00	3,00	3,20
Set/2002	5,27	10,20	6,00	3,00	3,20
Set/2002	5,30	11,10	6,01	3,00	3,20
Out/2002	5,50	11,30	6,05	3,00	3,25
Out/2002	5,50	11,30	6,05	3,08	3,30
Nov/2002	5,52	11,26	6,10	2,88	3,38
Nov/2002	5,52	11,32	6,11	2,60	3,25
Dez/2002	5,64	11,37	6,15	3,00	3,44
Cota (m)	10,00	15,83	6,11	9,03	18,00

O poço PM-1, situado próximo ao Lago Água Preta, não apresentou variações importantes (Figura 6.14), se comportando com o terceiro mais raso. No entanto, o poço PM-2, também situado próximo ao lago, exibiu a mesma tendência da maioria dos poços, mas em comparação com os demais, demonstrou sofrer uma maior influência em seu nível, provavelmente por ser o que se encontra mais próximo de um dos poços bombeados pelo Exército, sendo considerado o quinto mais raso. (Figura 6.15).

O poço PM-3 se comportou como o quarto mais raso e apresentou variações quase inexistentes, similar ao poço PM-4, que apesar de ser considerado o mais raso da bateria de poços, também apresentou variações desprezíveis. Este fato se atribui provavelmente devido estes

dois poços se encontrarem localizados em uma zona intermediária de descarga e recarga (Figura 6.16 e 6.17).

O poço PM-5, situado na área do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém, não apresentou variações importantes, comportando-se como a maioria dos demais poços (Figura 6.18).

A variação sazonal da pluviosidade não interferiu na variação dos níveis estáticos de todos os poços de monitoramento e, apesar de os mesmos não apresentarem variações importantes, o comportamento similar apresentando por todos eles, sugere que os referidos poços foram instalados provavelmente em um mesmo aquífero.

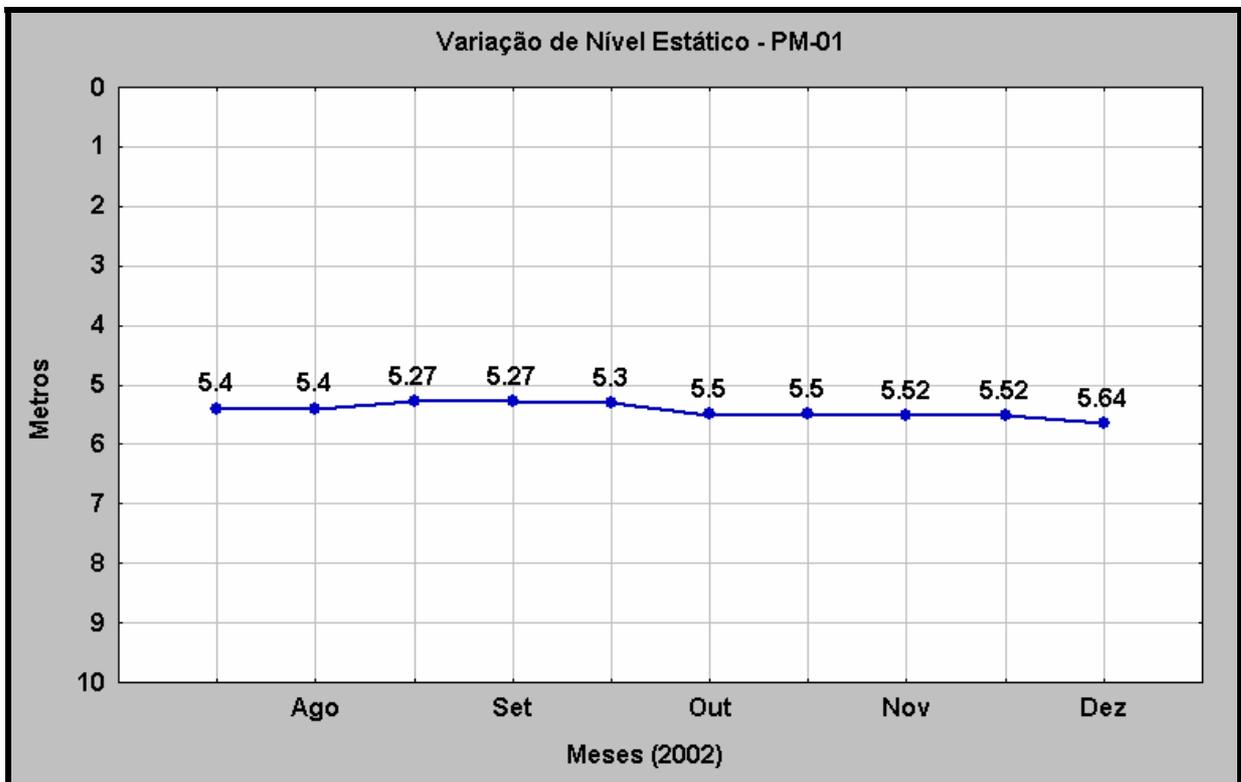


Figura 6.14 - Variação de Nível Estático (PM-1).

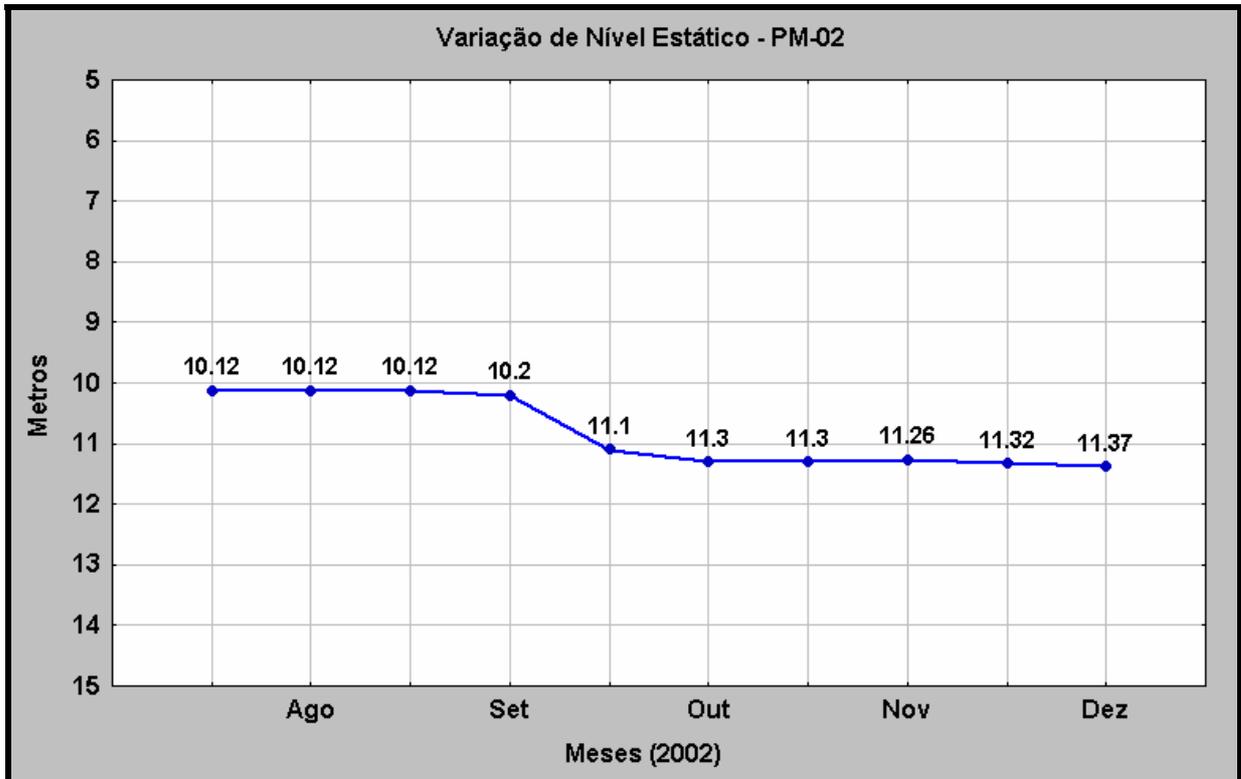


Figura 6.15 - Variação de Nível Estático (PM-2).

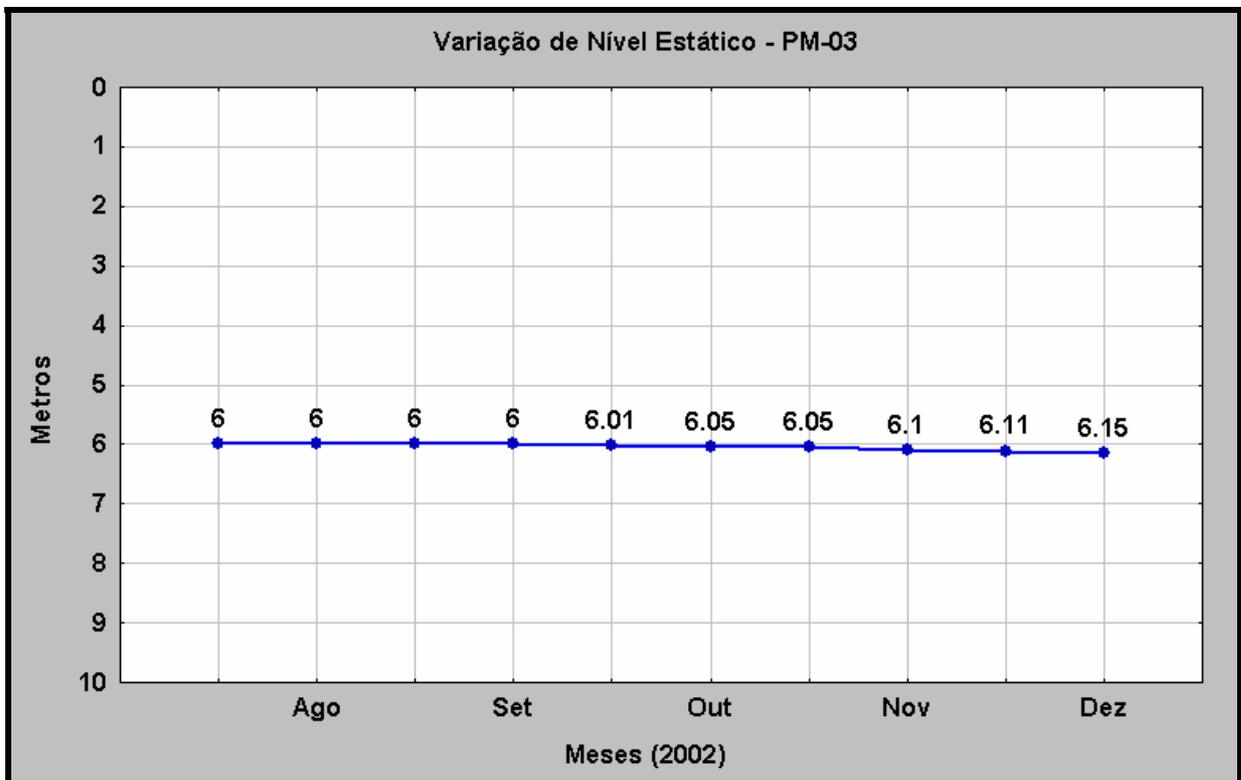


Figura 6.16 - Variação de Nível Estático (PM-3).

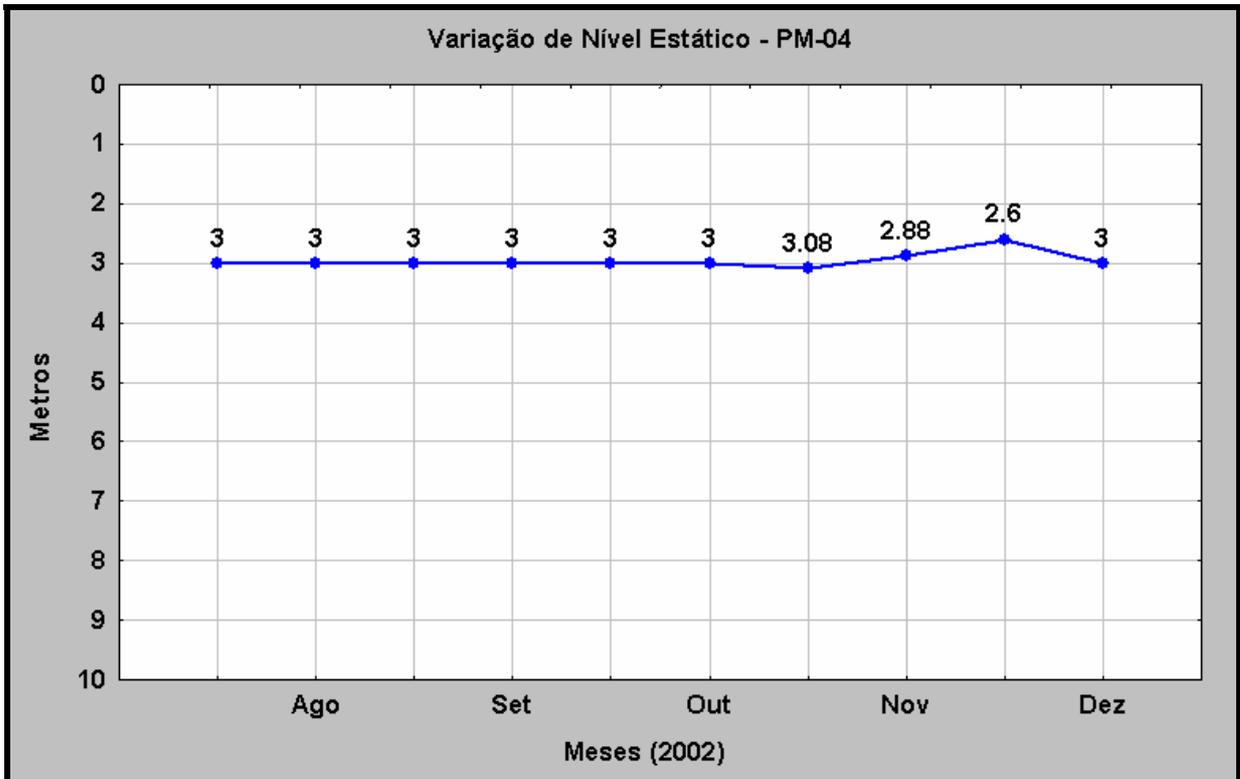


Figura 6.17 - Variação de Nível Estático (PM-4)

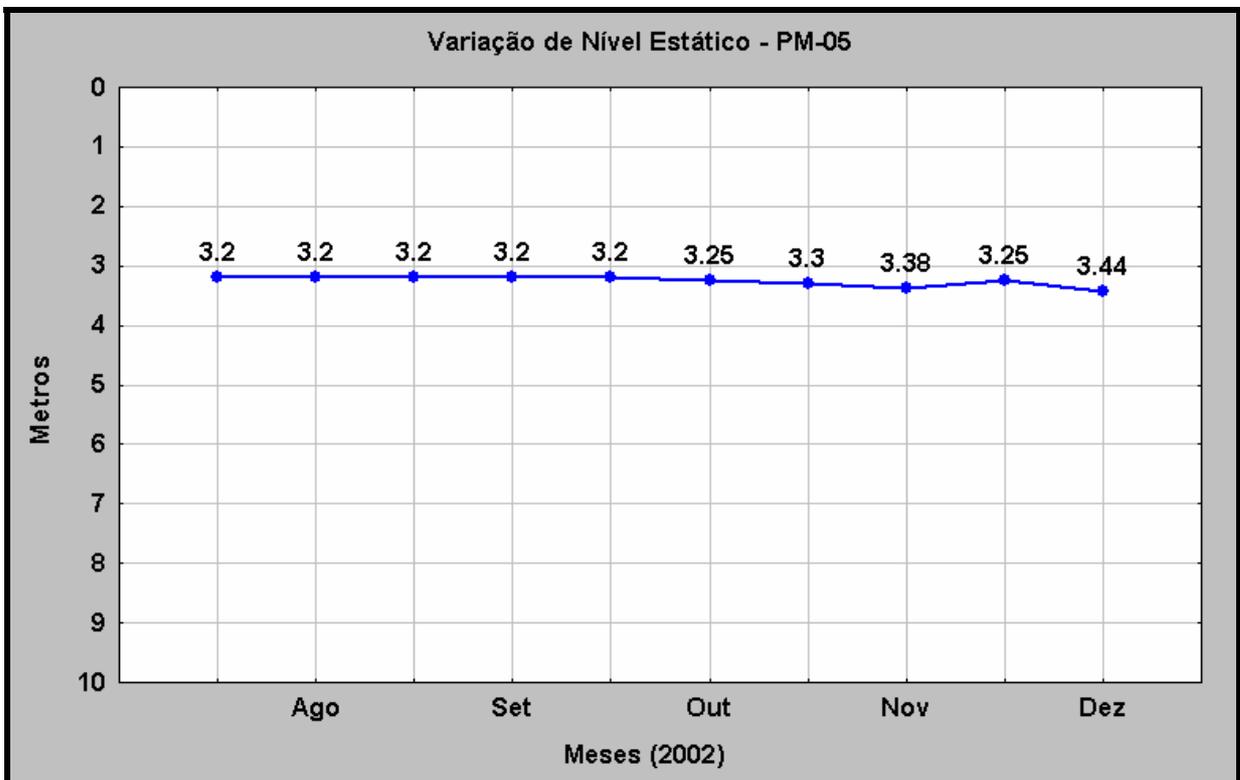


Figura 6.18 - Variação de Nível Estático (PM-5)

6.2.3 - Estimativa da condutividade hidráulica

6.2.3.1 - Utilizando a curva granulométrica

Com base na metodologia utilizada pelo Laboratório de Sedimentologia do Centro de Geociências da UFPA (Figura 5.5), as amostras coletadas por ocasião da construção dos poços de monitoramento foram lavadas e peneiradas com a finalidade de separar as frações grossas das frações finas. Após este processo, os dados obtidos com a referida metodologia foram processados e plotados em curvas granulométricas, cujos resultados forneceram as informações necessárias para o cálculo da condutividade hidráulica mediante o Método de Hazen (Figuras 6.19 a 6.26).

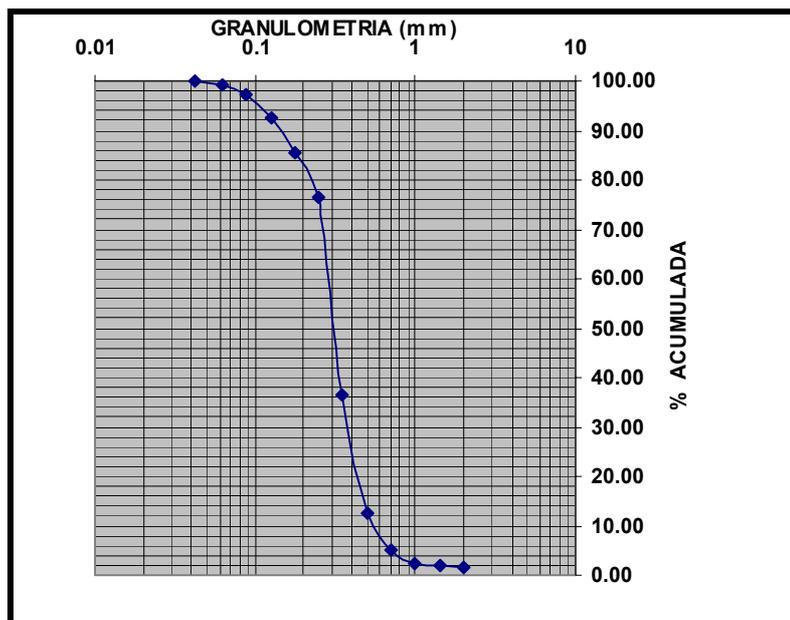


Figura 6.19 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-1 coletados entre 11m-13m.

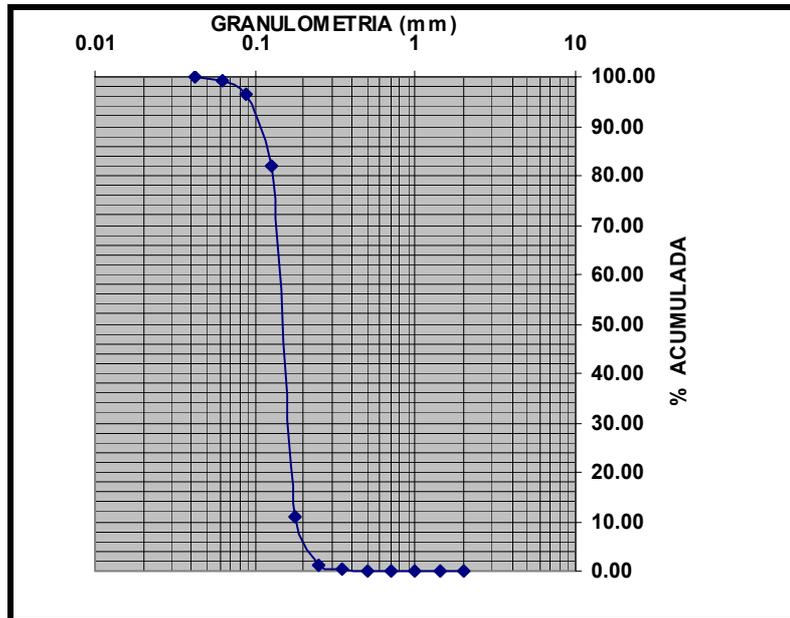


Figura 6.20 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-1 coletados entre 19m-21m.

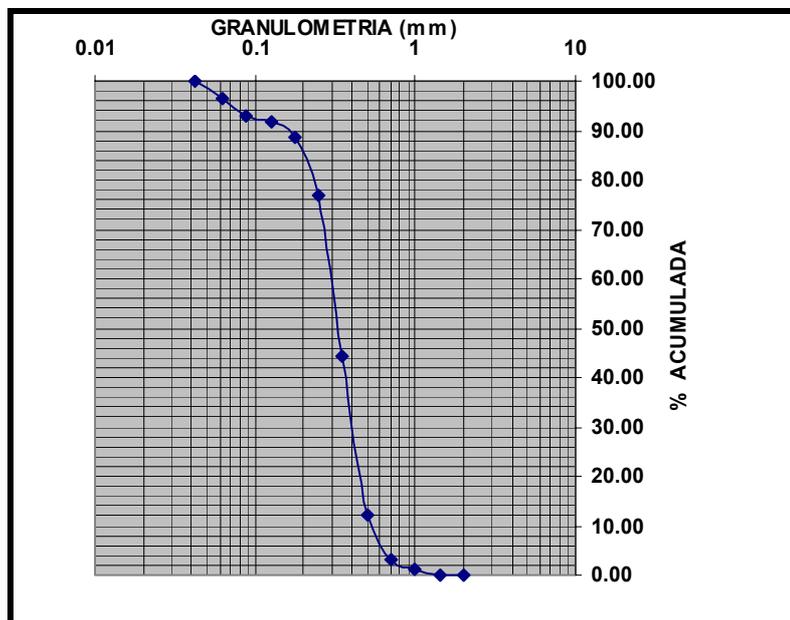


Figura 6.21 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-2 coletados entre 15m-19m.

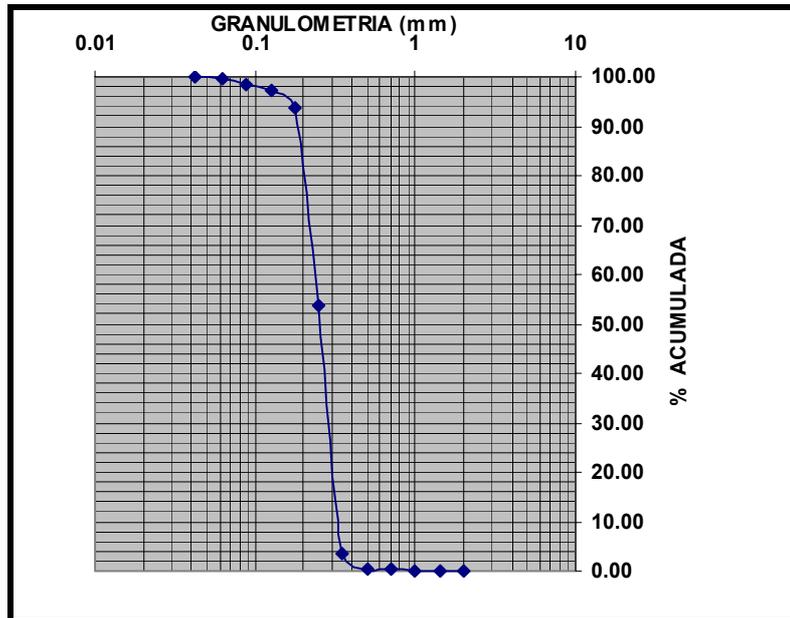


Figura 6.22 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-3 coletados entre 17m-19m.

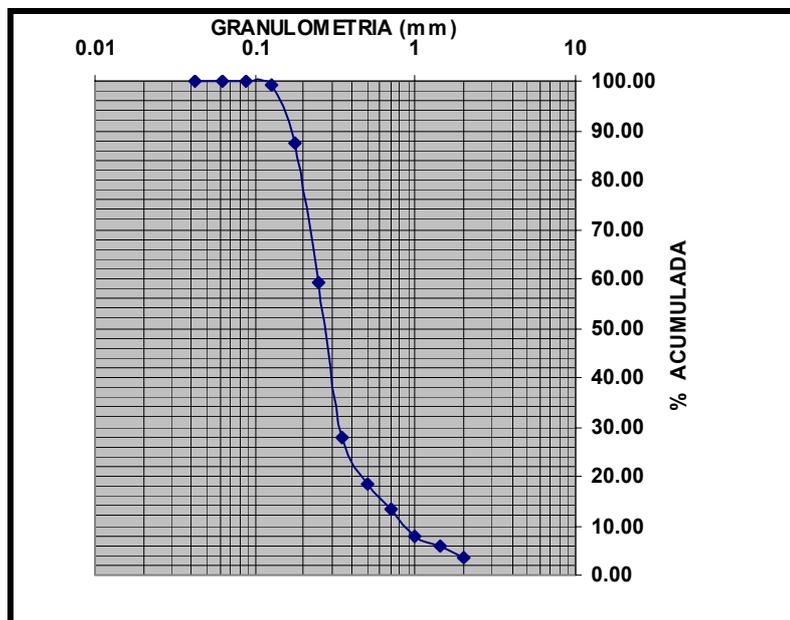


Figura 6.23 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-4 coletados entre 4m-12m.

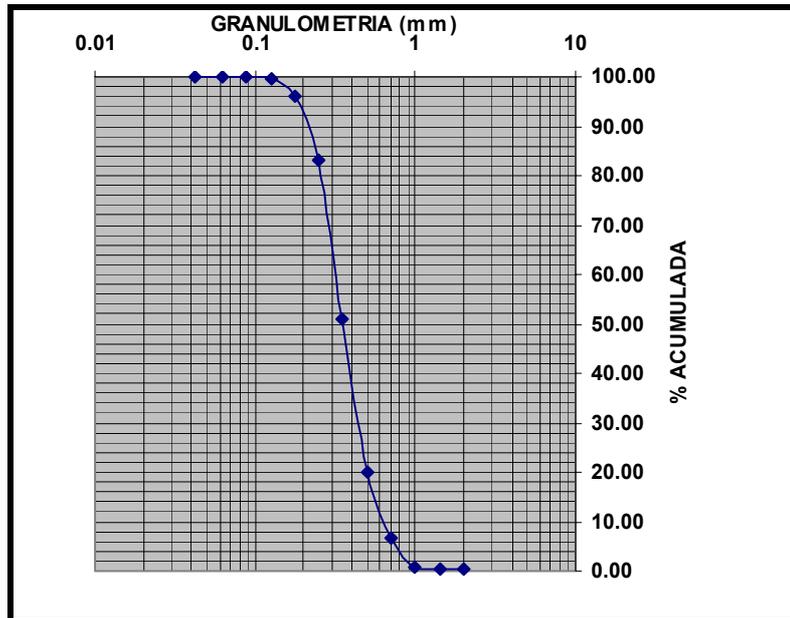


Figura 6.24 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-4 coletados entre 13m-16m.

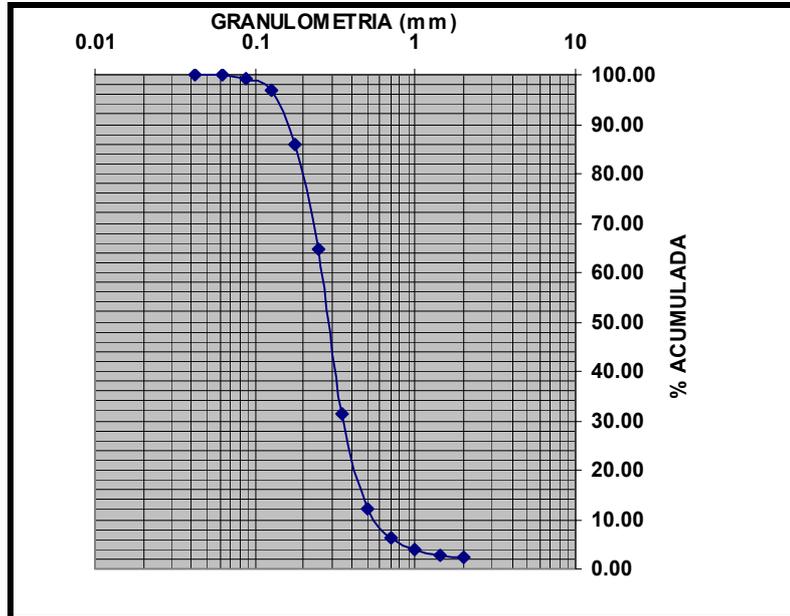


Figura 6.25 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-5 coletados entre 4m-7m.

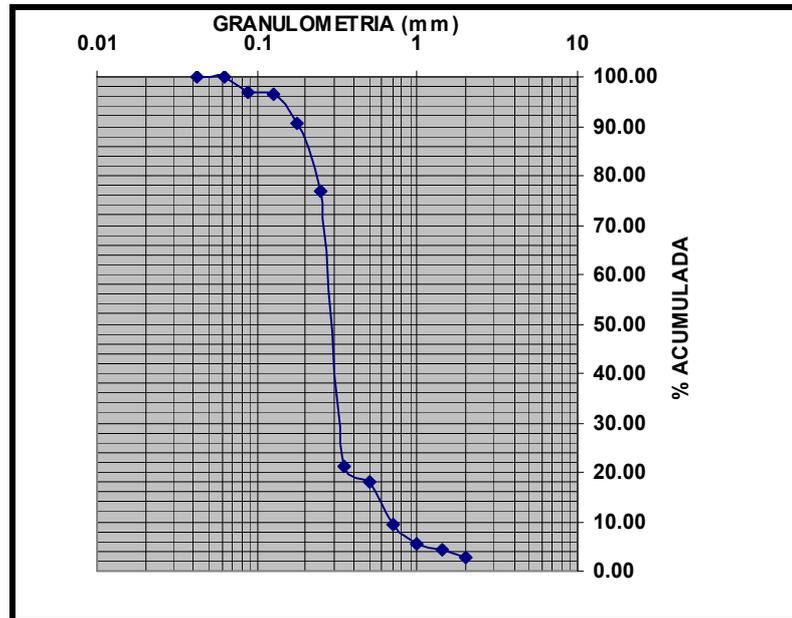


Figura 6.26 - Curva de granulometria dos sedimentos do poço PM-5 coletados entre 8m-9m.

As amostras coletadas apresentaram valores de coeficiente de uniformidade inferiores a 3 (Tabela 6.2), o que possibilitou a aplicação do Método de Hazen no cálculo da condutividade hidráulica (K) mediante o resultado da relação de d_{40}/d_{90} do material retido (Fetter, 1994).

Tabela 6.2 - Tamanho efetivo dos grãos, coeficiente de uniformidade e condutividade hidráulica das amostras de perfil coletadas na perfuração dos poços de monitoramento.

Localização	D ₄₀ , % retido	D ₉₀ , % retido	C. U. D ₄₀ /D ₉₀	D ₁₀	K (cm/s)
PM-1 (11m – 13 m)	0,32	0,15	2,13	0,15	$2,25 \times 10^{-2}$
PM-1 (19m – 21m)	0,18	0,12	1,50	0,12	$1,44 \times 10^{-2}$
PM-2 (15m – 19m)	0,38	0,18	2,11	0,18	$3,24 \times 10^{-2}$
PM-3 (17m – 19m)	0,27	0,18	1,50	0,18	$3,24 \times 10^{-2}$
PM-4 (04m – 12m)	0,30	0,16	1,87	0,16	$2,56 \times 10^{-2}$
PM-4 (16m – 19m)	0,40	0,22	1,81	0,22	$4,84 \times 10^{-2}$
PM-5 (04m – 07m)	0,31	0,16	1,93	0,16	$2,56 \times 10^{-2}$
PM-5 (08m – 09m)	0,30	0,18	1,66	0,18	$3,24 \times 10^{-2}$

Os valores obtidos de condutividade hidráulica, se encontram compatíveis com a faixa de sedimentos presente na área de estudo, conforme faixa de valores de condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados (Tabela 6.3).

Tabela 6.3 - Faixa de valores de permeabilidade intrínseca e condutividade hidráulica para vários materiais não consolidados.

Material	Permeabilidade Intrínseca (cm ²)	Condutividade Hidráulica (cm/s)
Argila	$10^{-14} - 10^{-11}$	$10^{-9} - 10^{-6}$
Silte; Silte arenoso	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia argilosa	$10^{-11} - 10^{-9}$	$10^{-6} - 10^{-4}$
Areia siltosa; Areia fina	$10^{-10} - 10^{-8}$	$10^{-5} - 10^{-3}$
Areia bem distribuída	$10^{-8} - 10^{-6}$	$10^{-3} - 10^{-1}$
Cascalho bem distribuído	$10^{-7} - 10^{-5}$	$10^{-2} - 10^{-0}$

Fonte: Fetter (1994).

6.2.3.2 - Determinação da condutividade hidráulica (K) por ensaio de bombeamento

Foram executados ensaios de bombeamento nos cinco poços de monitoramento existentes na área de estudo visando a determinação da condutividade hidráulica (K).

Dois ensaios foram realizados em setembro/2002 e os demais em outubro/2002. No decorrer dos ensaios, o rebaixamento dos poços foi monitorado e medido periodicamente através de medidor eletro-sonoro, mediante uma vazão constante controlada por períodos de tempo iguais.

Os valores coletados foram inseridos no programa computacional Aquifer Test, o que utiliza o Método de Jacob (1966) para estimar os valores referentes à condutividade hidráulica, os resultados encontram-se representados nas Figuras 6.27 a 6.31.

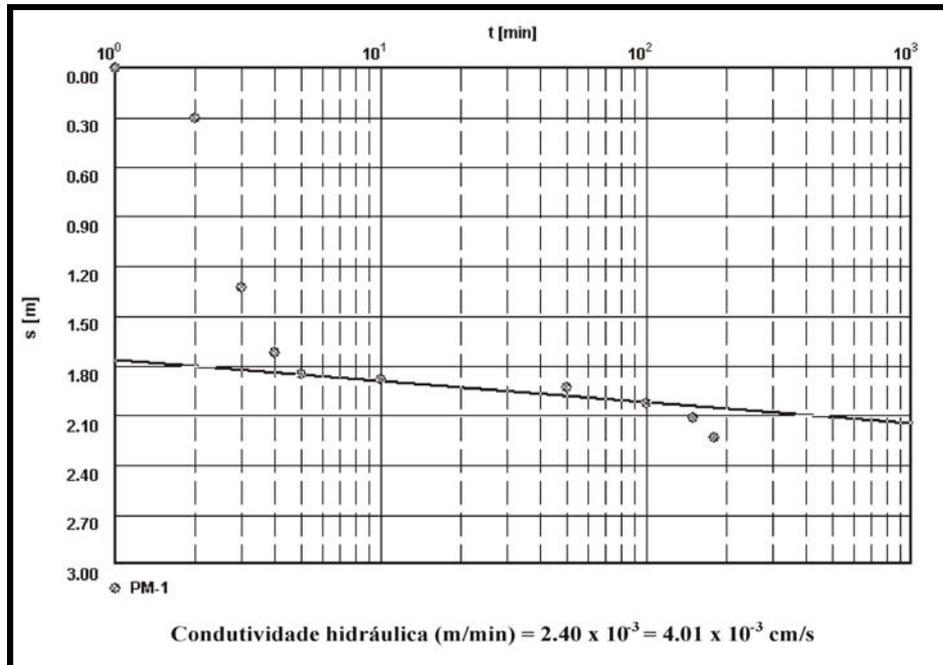


Figura 6.27 - Evolução do rebaixamento do PM-1 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).

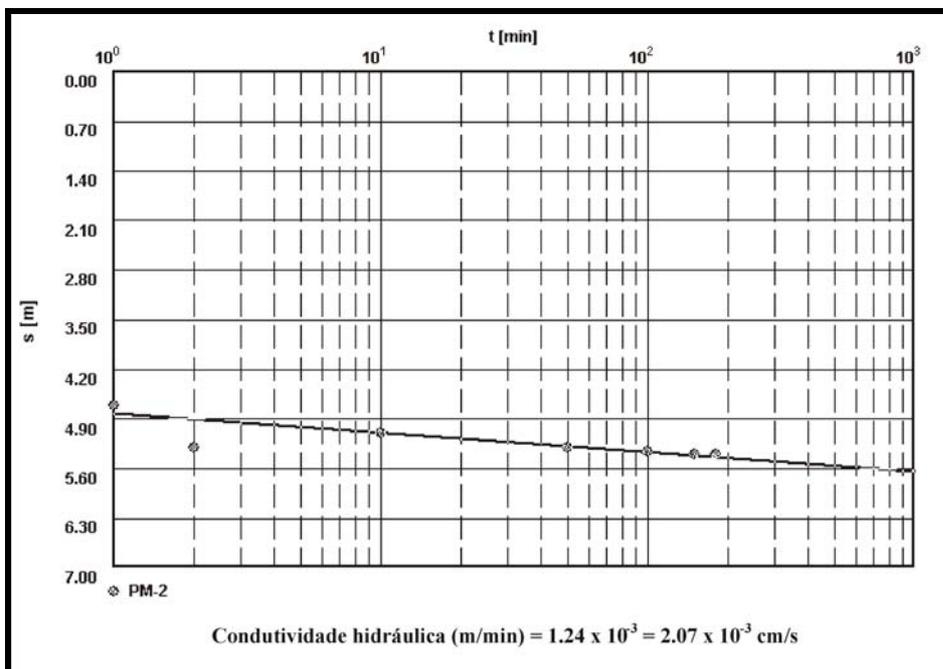


Figura 6.28 - Evolução do rebaixamento do PM-2 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).

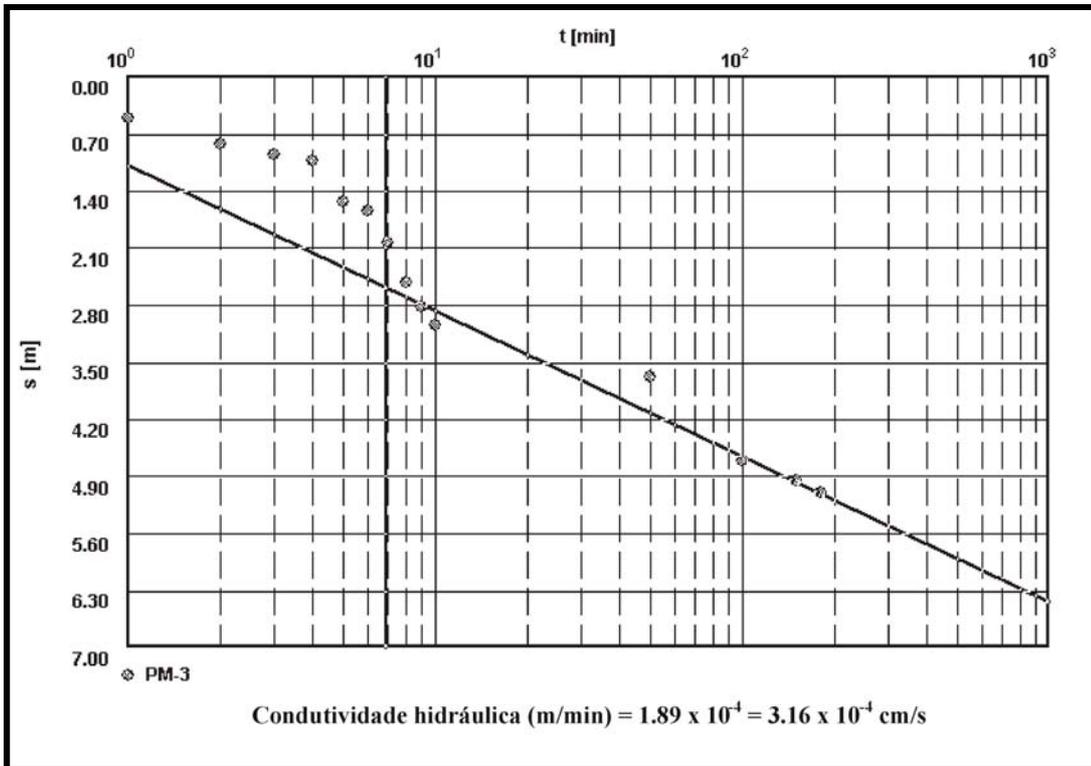


Figura 6.29 - Evolução do rebaixamento do PM-3 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).

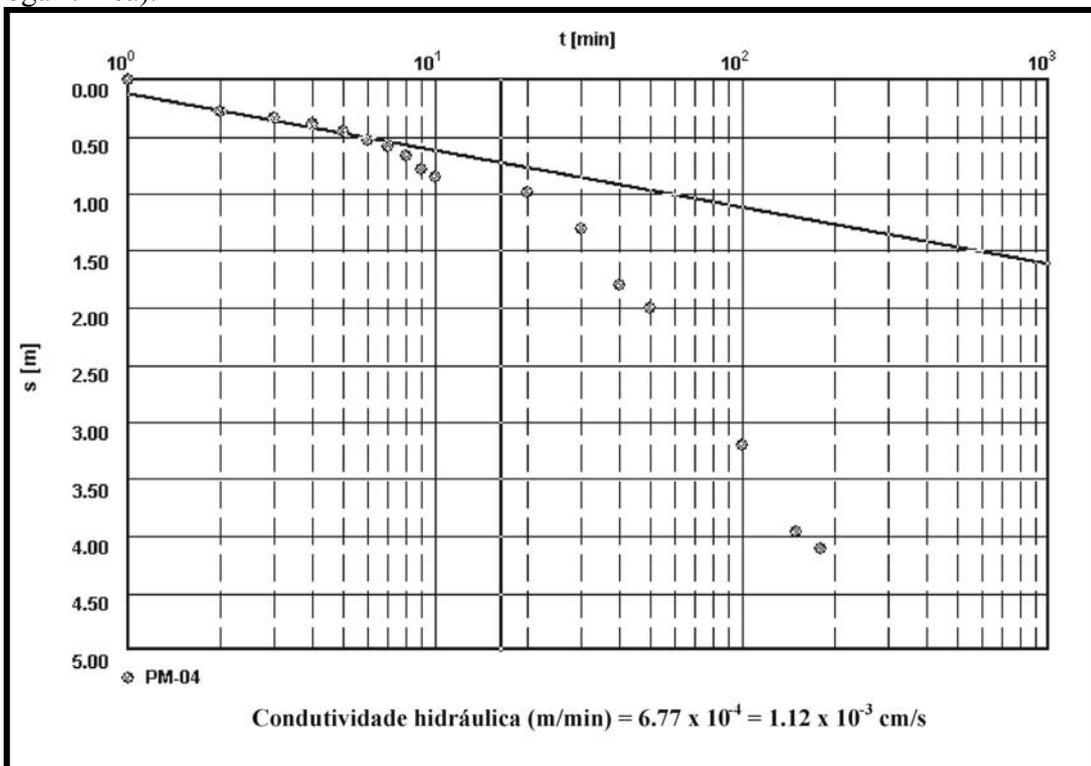


Figura 6.30 - Evolução do rebaixamento do PM-4 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).

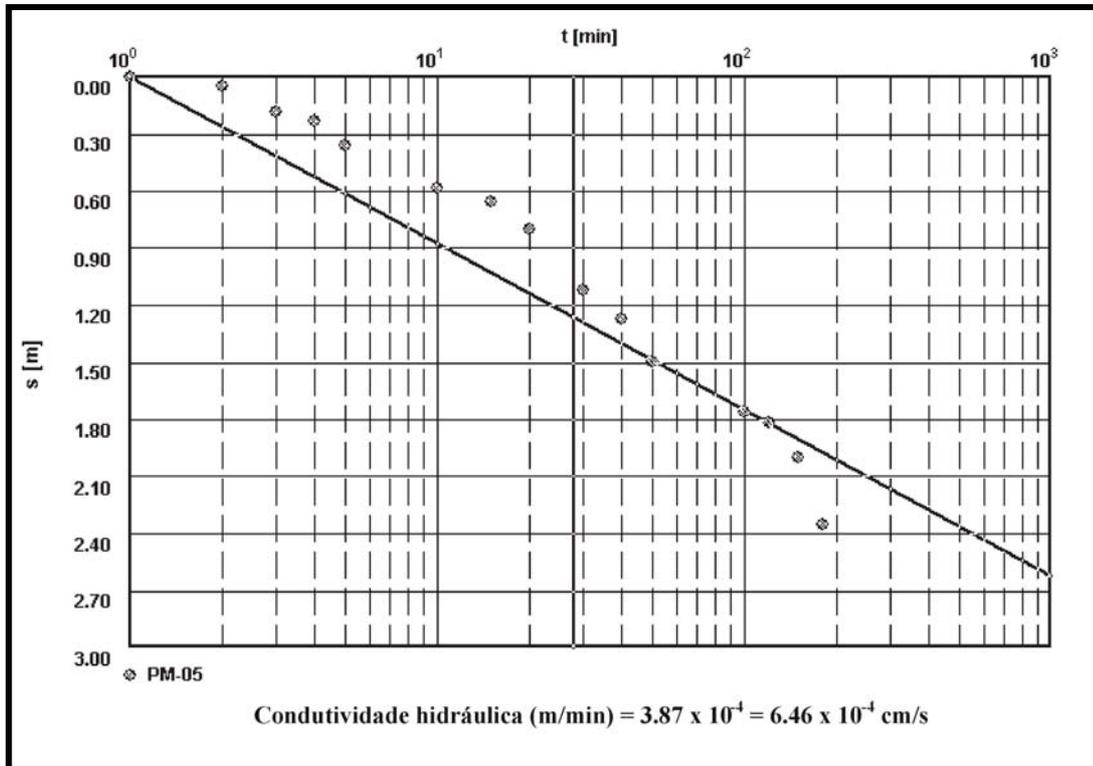


Figura 6.31 - Evolução do rebaixamento do PM-5 em função do tempo de bombeamento (escala semilogarítmica).

Os valores de condutividade hidráulica obtidos no presente estudo, são compatíveis com o ambiente geológico encontrado na área (Fetter, 1994).

6.2.3.3 - Ensaio de Permeabilidade

Mediante a metodologia do Slug Test, aplicada em três dos poços de monitoramento (PM-1, PM-3 e PM-4) instalados na área de estudo, foi possível determinar valores de condutividade hidráulica, que serviram de comparação com os valores obtidos com os demais métodos. Os valores obtidos se encontram representados nas Figuras 6.32 a 6.34. Esses valores se encontram compatíveis com a faixa de valores apresentados por Fetter (1994).

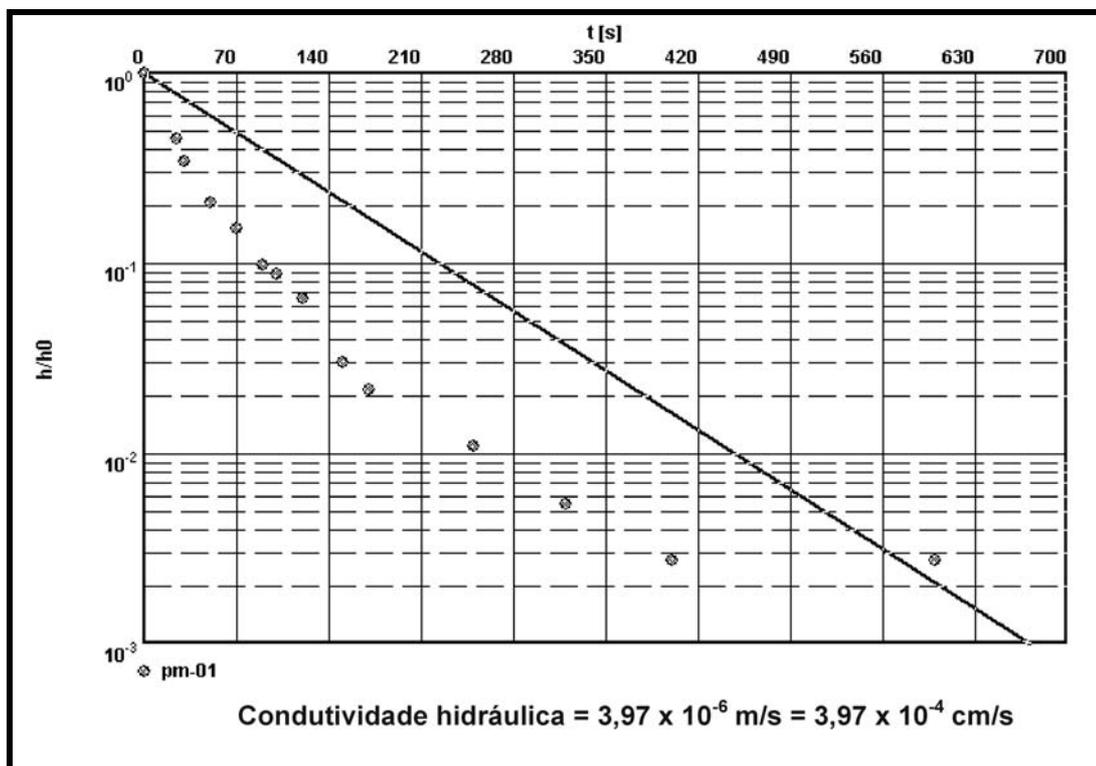


Figura 6.32 - Evolução do rebaixamento do PM-1 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).

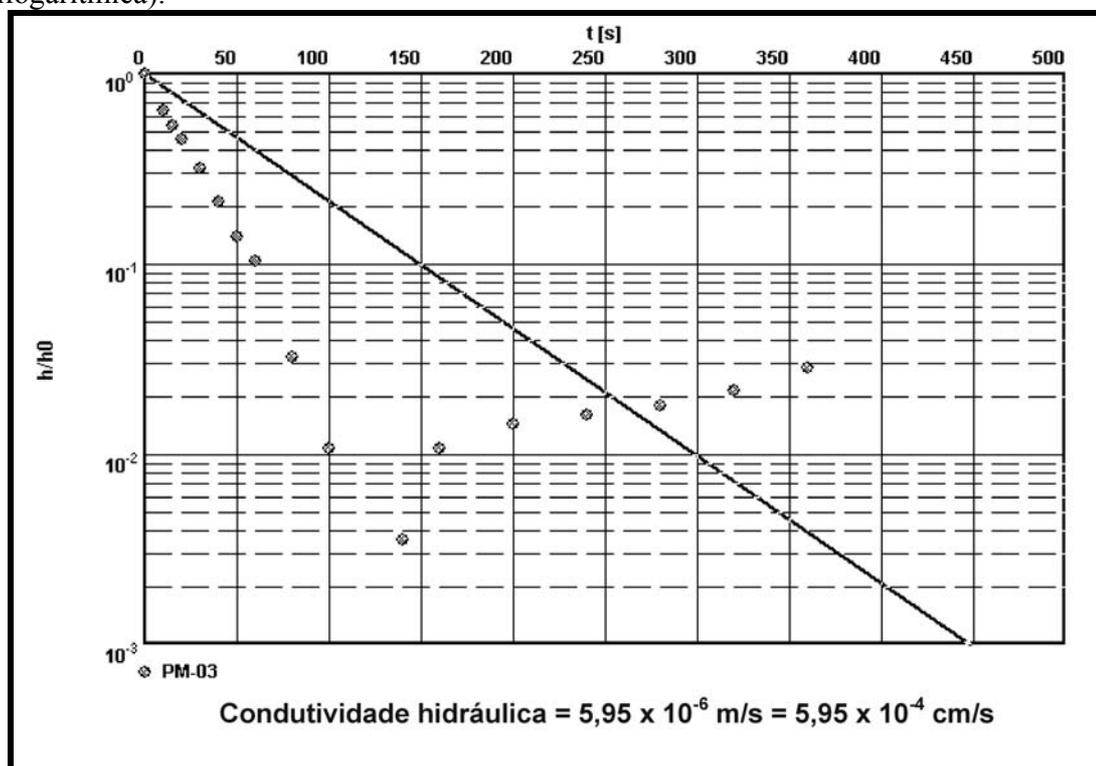


Figura 6.33 - Evolução do rebaixamento do PM-3 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).

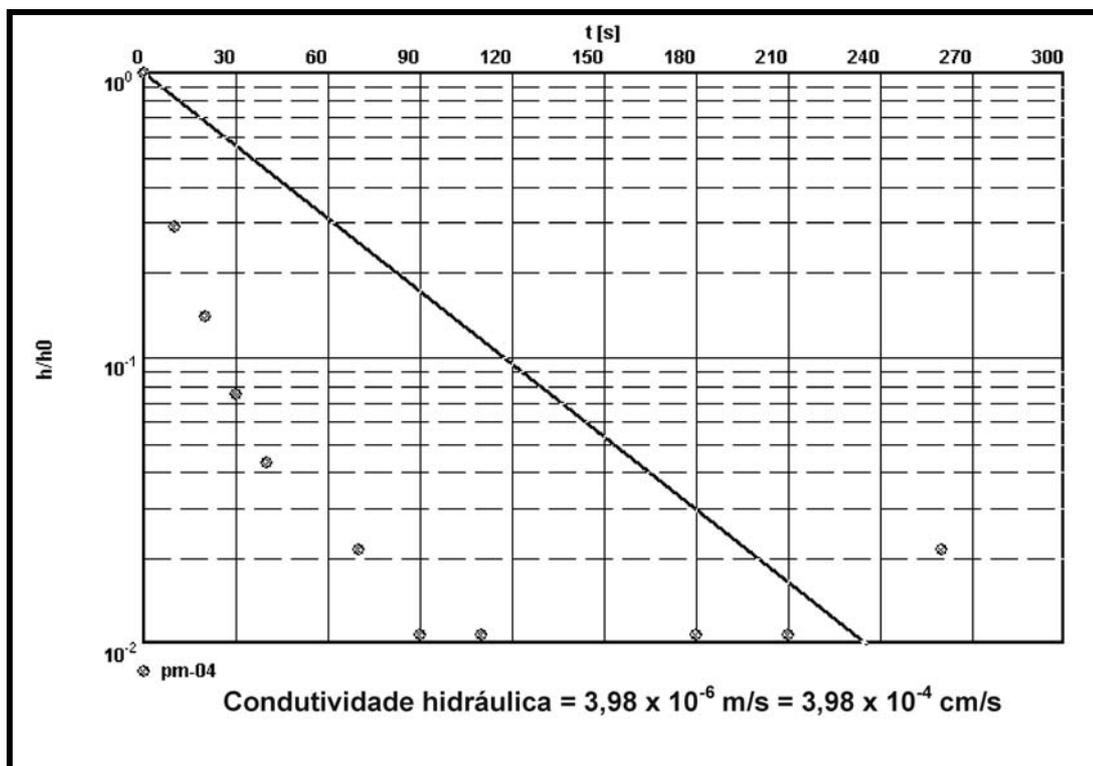


Figura 6.34 - Evolução do rebaixamento do PM-4 em função do método Slug Test (escala semilogarítmica).

6.2.4 - Determinação da porosidade

Os valores de porosidade foram estimados mediante a utilização de amostras deformadas (amostras de calha) e não deformadas (testemunhos), que foram coletadas por ocasião da instalação dos poços de monitoramento.

Após o processo metodológico laboratorial, tanto as amostras deformadas quanto às de estrutura não deformadas apresentaram uma porosidade total de 28%. Tal valor corresponde aos valores associados à areia siltosa ou areia argilosa (Heath, 1989).

Os valores de porosidade efetiva apresentados abaixo (Tabela 6.4) se encontram compatíveis com os valores de porosidade total obtido a partir dos dois métodos de análises realizadas nas amostras de solo em laboratório.

Tabela 6.4 - Valores representativos de porosidade efetiva para alguns materiais geológicos.

Litologia	Porosidade Efetiva (%)
Argila	1 – 10
Areia	10 – 30
Cascalho	15 – 30
Areia e cascalho	15 – 25
Arenito	5 – 15
Folhelho / Calcário	0,5 – 5

Fonte: Driscoll (1987).

Analisando os valores de porosidade total obtidos pelos dois métodos aplicados em laboratório nas amostras de solos coletadas por ocasião da instalação dos poços de monitoramento, verificou-se nenhuma variação na média percentual para os sedimentos da área estudada. Assim sendo, considerou-se a porosidade total como similar à porosidade efetiva.

6.2.5 - Gradiente hidráulico e velocidade dos fluxos subterrâneos

Foram calculados os gradientes entre todos os poços de monitoramento localizados na área e para efeito de cálculo obteve-se a média entre eles, tanto no período chuvoso, quanto no período seco.

O gradiente hidráulico não apresentou alterações significativas no que se refere aos períodos, visto que o valor obtido de 0,011 m/m, ocorreu tanto para a época de chuvas como para a época de seca. Este fato deve estar relacionado a não flutuação do lençol freático, que não experimentou maiores mudanças.

Mediante os valores obtidos de porosidade, condutividade hidráulica e gradiente hidráulico, estimou-se a velocidade do fluxo da água na área.

Para efeito de cálculo, utilizou-se a média dos valores obtidos de condutividade hidráulica através dos ensaios de bombeamento (por se tratar de um método bem mais eficaz para obtenção dos valores relacionados à condutividade hidráulica) nos cinco poços de monitoramento (Figuras 6.27 a 6.31), cujo valor médio foi de $1,632 \times 10^{-5}$ m/s. Este valor, em conjunto com o valor de 28% de porosidade e o valor de 0,011 referente ao gradiente hidráulico da área, permitiu estimar a verdadeira velocidade dos fluxos através das Equações 5.5 e 5.6.

Para uma melhor análise, os cálculos efetuados sobre estimativa de velocidade dos fluxos laminares se encontram representados abaixo:

$$V = K \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l * \eta}$$

Sendo:

$$K = 1,632 \times 10^{-5} \text{ m/s}$$

$$\eta = 0,28 \text{ (28\%)}$$

$$V = (1,632 \times 10^{-5} \text{ m/s}) \times (0,011) / 0,28$$

$$V = 6,36 \times 10^{-7} \text{ m/s} = 0,0549 \text{ m/dia} = 20,03 \text{ m/ano}$$

Assim sendo, a estimativa da velocidade dos fluxos laminares da água e dos poluentes de maior mobilidade geoquímica correspondeu a 20,03 m/ano. Levando-se em conta o início das operações do Depósito de Lixo Metropolitano de Belém em 1991, esses poluentes provavelmente já percorreram uma distância aproximada de 200,3 metros.

Com as informações obtidas através do levantamento topográfico executado na área, em conjunto com as medidas de profundidade do lençol freático correspondentes ao tempo de seca e de chuva, elaborou-se um modelo tridimensional visando simular o comportamento do lençol freático em ambos os períodos (Figura 6.35 e Figura 6.36).

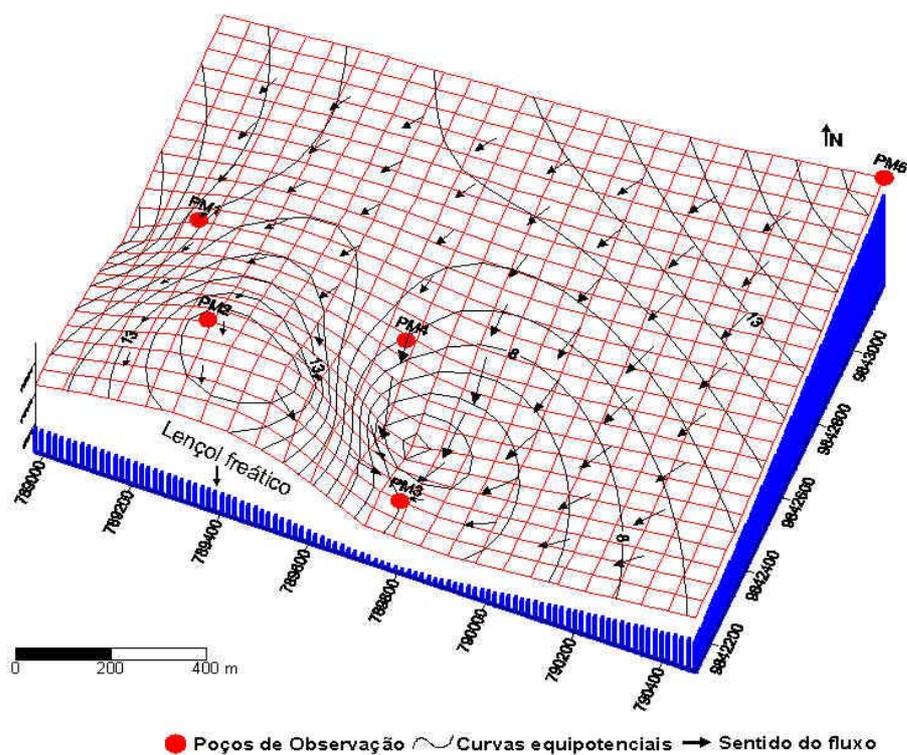


Figura 6.35 - Modelo tridimensional mostrando a topografia e o fluxo referente ao período chuvoso.

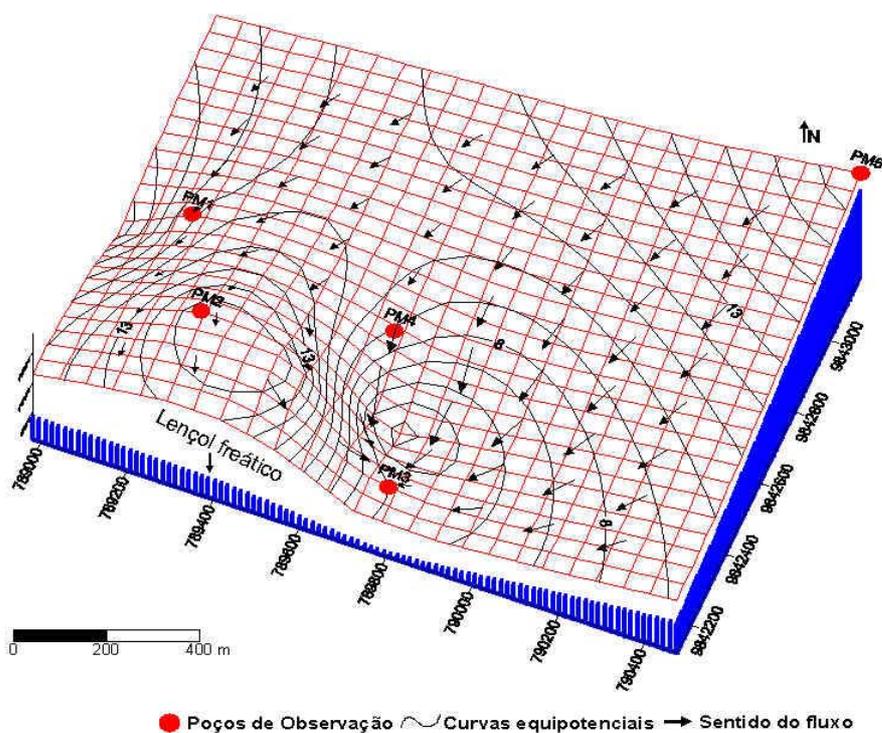


Figura 6.36 - Modelo tridimensional mostrando a topografia e o fluxo do lençol freático referente ao período seco.

Os resultados hidrodinâmicos obtidos com os métodos diretos, indicaram que o fluxo subterrâneo segue na direção oeste-leste e leste-sul. No entanto, não há evidências de que os fluxos subterrâneos originados no depósito de resíduos se desloquem em direção ao lago, pois se devem considerar outras variáveis como a existência de outros poços e principalmente do igarapé Santo Antônio, que atua como um sistema drenante dos fluxos superficiais e subterrâneos na área, agindo como uma barreira natural e protetora, o que diminui a possibilidade de o aquífero ser atingido por fluxos superficiais e subterrâneos originados do local de descarga dos resíduos sólidos.

6.2.6 - Distribuição geométrica dos aquíferos

Os aquíferos localizados na área de estudo são do tipo confinado e se apresentam protegidos por uma camada de material argiloso. As Figuras 6.37 e 6.38 mostram a distribuição geométrica dos aquíferos existentes na área.

Os aquíferos identificados no depósito de resíduos sólidos, são representados pelo aquífero A, que é formado por uma camada arenosa que se encontra protegido na sua parte superior por uma camada de argila arenosa com espessura de 4 metros e em sua parte inferior por uma lâmina de argila siltosa de aproximadamente 1 metro de espessura. Abaixo desta lâmina existe uma outra camada arenosa confinada que apresenta em sua camada inferior um pacote de argila siltosa com aproximadamente 10 metros de espessura.

As análises químicas realizadas nas águas desses aquíferos, mostraram que ele não estão sendo atingidos pelo deslocamento subterrâneo do chorume. Isto ocorre provavelmente pela não conexão dos aquíferos identificados com os que estão sendo atingidos ao sul da área do depósito de resíduos (Piratoba Morales, 2002).

Outros aquíferos detectados estão localizados à oeste e sudoeste da área de estudo. Estes aquíferos são formados por uma camada arenosa confinada, com sua parte superior apresentando camadas de argila que variam de marrom, variegada e siltosas avermelhadas, com espessuras de até 12m. Foi detectada uma camada arenosa confinada, identificada logo abaixo da primeira camada arenosa, com espessura em torno de 3m e separada da primeira camada apenas por uma lâmina de argila arenosa com aproximadamente 1 metro de espessura.

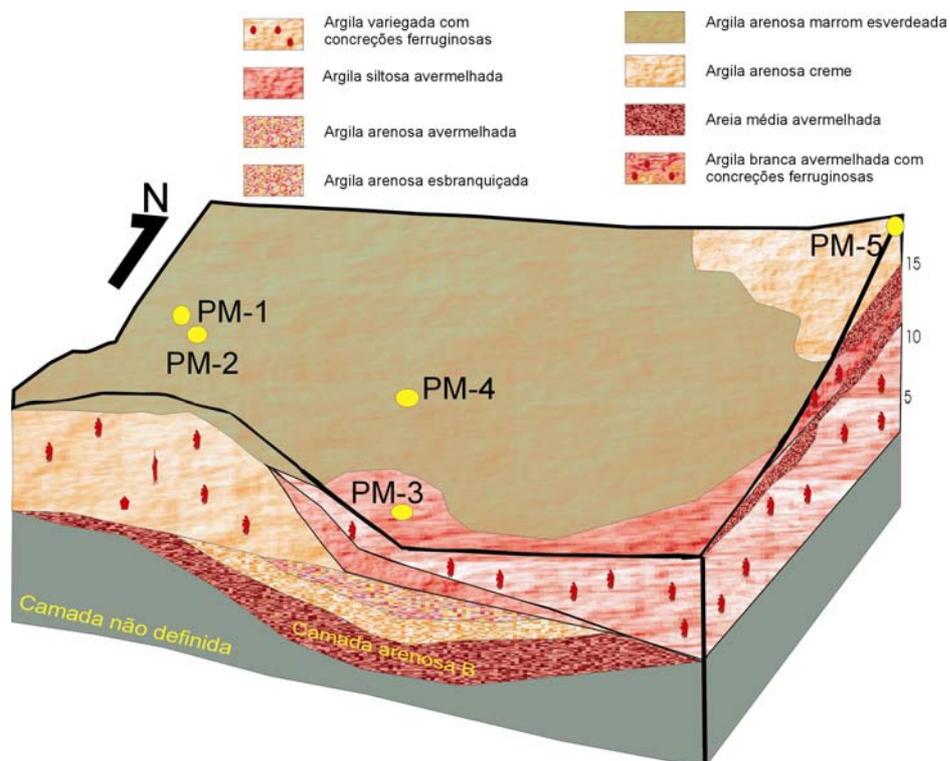


Figura 6.37 - Visão geométrica frontal dos aquíferos da área de estudo.

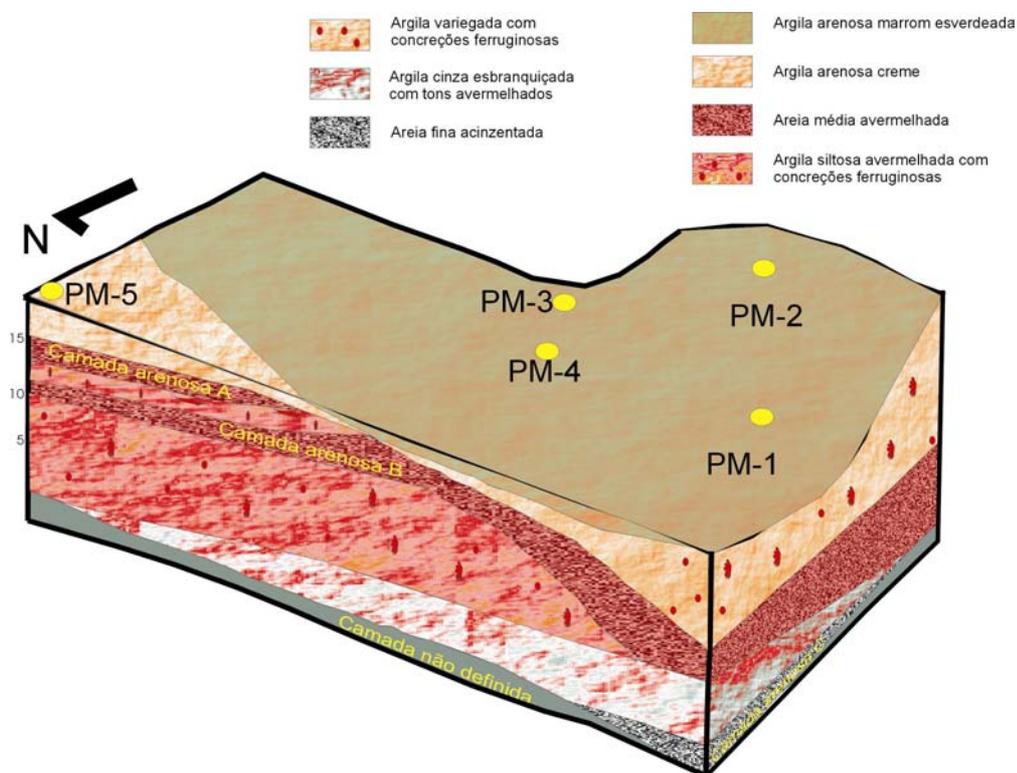


Figura 6.38 - Visão geométrica lateral dos aquíferos da área de estudo.

6.3 - DESLOCAMENTO SUBTERRÂNEO DO EFLUENTE E SEU EFEITO NA HIDROGEOLOGIA LOCAL

Foi realizada uma campanha de coleta de água no sistema hídrico subterrâneo, visando obter resultados que indicassem a influência do deslocamento do chorume na área de estudo.

Foram coletadas amostras em todos os poços de monitoramento, onde foram quantificados os parâmetros físico-químicos considerados traçadores de chorume, tais como: pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio.

A campanha de coleta de amostragem foi realizada na época de seca, mais precisamente no mês de outubro/2002. Os resultados analíticos dos diferentes parâmetros encontram-se relacionados na Tabela 6.5.

O ponto de coleta PM-5 foi considerado como representativo das características químicas das águas subterrâneas da área, visto que o mesmo se encontra localizado dentro da área de abrangência do depósito de resíduos e suscetível de estar contaminado pelo chorume.

Tabela 6.5 - Concentração dos elementos nas amostras de água coletadas nos poços de monitoramento da área de estudo.

Parâmetro	PM-1	PM-2	PM-3	PM-4	PM-5
NO ₂ (mg/l)	0.05	0.03	0.01	0.13	0.01
NH ₄ (mg/l)	0.15	0.02	0.05	0.07	0.04
NO ₃ (mg/l)	1.06	1.12	0.47	3.07	2.98
Cl ⁻ (mg/l)	8.17	8.49	8.17	8.17	8.17
SO ₄ ²⁻ (mg/l)	2.65	1.89	1.95	3.01	2.61
Na ⁺ (mg/l)	7.70	1.65	1.39	1.12	1.41
Mg ²⁺ (mg/l)	0.26	0.37	0.71	0.57	0.60
Ca ²⁺ (mg/l)	0.32	1.08	4.26	1.81	4.26
K ⁺ (mg/l)	0.30	0.47	1.09	0.86	0.70
DQO (mg/l)	22.84	22.84	27.92	22.84	66.75
O.C. (mg/l)	0.46	0.95	1.37	0.32	4.36
Fe sol. (mg/l)	0.52	0.61	0.21	0.41	0.08
Alcalinidade (mgCaCO ₃ /l)	8.61	25.00	155.00	46.60	154.50
Condutividade (µS/cm)	28.6	31.4	45.9	32.00	32.6
pH	4.00	3.85	5.00	4.60	5.20
Temperatura (°C)	27.50	27.20	27.30	26.90	28.50

Do ponto de vista geoquímico, os elementos que apresentaram as maiores concentrações foram os cátions K^+ e Na^+ e os ânions mais abundantes foram Cl^- e SO_4^{2-} .

Os valores de concentração de DQO se encontram parecidos na maioria dos poços, o que ocorre provavelmente devido os mesmos possuírem a mesma origem. A relação entre DQO e O.C. é muito alta, mostrando que as espécies inorgânicas se encontram susceptíveis de serem oxidadas. Esse fato ratifica a pouca presença de influência antropogênica ou carga orgânica.

Os valores baixos de Condutividade evidenciam a presença de ambientes altamente lixiviados, possivelmente causados pela alta pluviosidade e temperaturas da região amazônica. Esses valores considerados baixos de Condutividade é refletido nos baixos valores de íons dissolvidos (Cl^- e SO_4^{2-}), causam uma baixa carga iônica na solução.

Os compostos nitrogenados NO_2 , NH_4 , NO_3 apresentaram baixa concentração nas três espécies, não ultrapassando os limites permitidos (CONAMA, 1986; WHO, 1993). Esta baixa concentração pode significar a ausência de fontes antropogênicas próximas, sendo considerados como de origem natural.

A concentração de NO_3 sempre se apresentou maior que NO_2 , NH_4 , mostrando uma maior influência natural. Esta ausência de influência antropogênica, foi refletida nos baixos valores de Oxigênio Consumido, mostrando a pouca presença de matéria orgânica.

Os valores de pH apresentaram-se todos ácidos. Isto indica que os elementos alcalinos (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+}), de alta mobilidade geoquímica pelos processos intempéricos, foram lixiviados e migraram. Isto é comprovado pelos valores de alcalinidade relativamente baixos, como é o caso dos poços PM-1, PM-2 e PM-4. Outra causa, provavelmente, é a presença do ferro e do alumínio presente nas concreções lateríticas. Esses elementos sofrem o processo de hidrólise originando um pH ácido e fora dos padrões (CONAMA, 1986; WHO, 1993).

Os valores obtidos com os diferentes parâmetros, foram plotados no programa computacional AquaChem, no qual elaborou-se o gráfico de Piper (Figura 6.39), o qual sugere que as amostras de água são praticamente bicarbonatadas, cálcicas e sódicas, o que mostra ainda mais a sua origem natural.

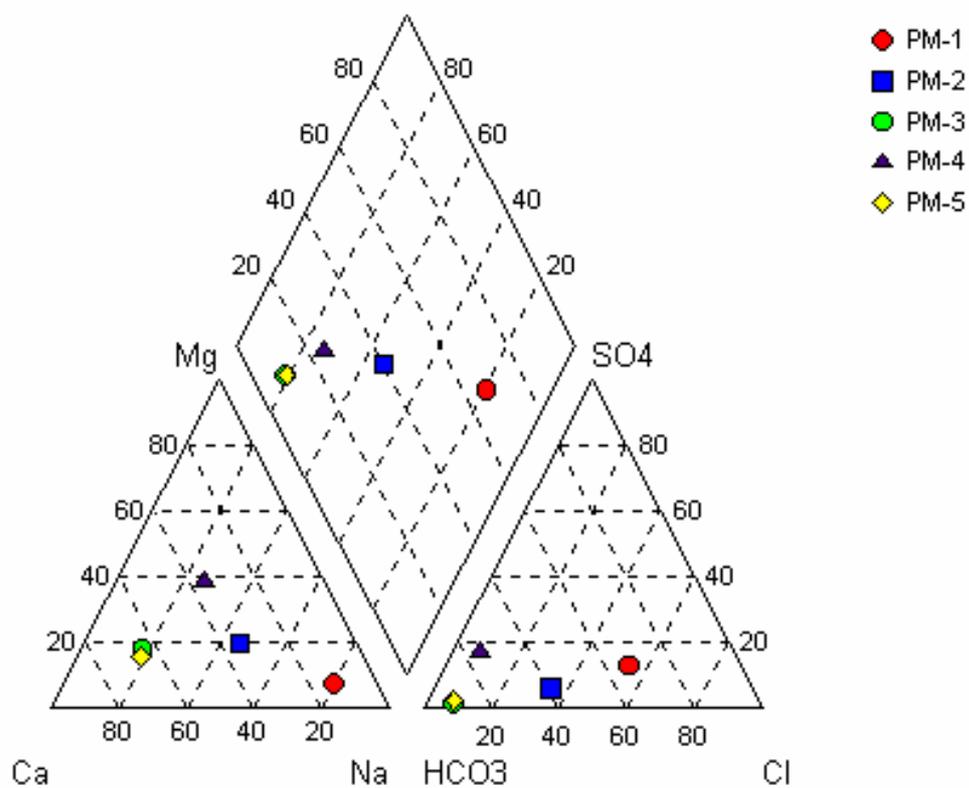


Figura 6.39 - Diagrama de Piper que mostra o comportamento dos traçadores de chorume (em eqgramo).

7 - CONCLUSÕES

As medidas eletromagnéticas realizadas na área de trabalho evidenciaram a presença de camadas geológicas com características elétricas diferentes (condutividade) que refletem a presença de zonas mais condutoras de camadas argilosas e a presença do lençol freático relativamente próximo à superfície do terreno.

A representação dos valores medidos na forma de módulo de campo versus frequência, permitiu uma melhor visualização da distribuição das zonas condutoras com a profundidade. Essa representação gerou uma imagem aparente de subsuperfície, que pode ser correlacionada com a distribuição dos sedimentos ao longo dos perfis de medidas, que apresentaram a predominância de argila de coloração marrom, variegada e esbranquiçada e de areia média à fina, relacionados aos sedimentos do Quaternário e ao Grupo Barreiras.

Medidas obtidas mediante a aplicação de método indireto (Eletromagnético) mostraram variações litológicas em alguns dos pontos estudados, que foram corroborados mediante a utilização de métodos diretos (instalação de poços de monitoramento e coleta de amostras de calha).

Na análise da distribuição geométrica dos aquíferos, percebe-se que o tipo de aquífero predominante na área é do tipo confinado, protegido por camadas de material argiloso que variam de 4 a 17 metros.

Ensaio de bombeamento realizados na área apresentaram valores de condutividade hidráulica entre $4,01 \times 10^{-3}$ a $3,16 \times 10^{-4}$ cm/s (média de $1,63 \times 10^{-5}$ cm/s), com valores de porosidade efetiva de aproximadamente 28%, valor médio do gradiente hidráulico de 0,011, mostrando que os fluxos subterrâneos se deslocam a uma velocidade de aproximadamente 20,03 m/ano. As características hidrogeológicas da área associados ao tempo de funcionamento do depósito de lixo, indicam que uma eventual pluma de contaminação originada na área de depósito dos resíduos sólidos levaria 70 anos para atingir o lago Água Preta.

Os resultados hidrodinâmicos obtidos com os métodos diretos, indicaram que o fluxo subterrâneo segue na direção leste-oeste e leste-sul. No entanto, não há evidências de que os fluxos subterrâneos originados no depósito de resíduos se desloquem até os lagos.

Os resultados analíticos dos principais traçadores de chorume (pH, condutividade elétrica, alcalinidade, amônia, nitrato, cloreto, sódio, cálcio, magnésio e potássio) realizados nas

amostras de água subterrânea, coletadas nos poços de monitoramento, refletiram características ambientais dos recursos hídricos da área, não evidenciando deslocamento da pluma de contaminação na direção dos lagos.

Numa análise dos parâmetros geoquímicos em conjunto com sentido dos fluxos subterrâneos, constata-se que apesar dos fluxos se direcionarem para o lago Água Preta, não se pode afirmar que isso possa acontecer na realidade, visto que os resultados analíticos do poço PM-4, que se encontra localizado entre o poço PM-1 e PM-5, não mostraram evidência de o mesmo estar poluído. Além disso, deve-se considerar outras variáveis, como a existência de outros poços e principalmente do igarapé Santo Antônio, visto que o mesmo está atuando como um sistema drenante dos fluxos superficiais e subterrâneos na área. Considerando que o Depósito de Resíduos do Aurá, encontra-se no lado oposto do lago, esse igarapé atuaria como uma barreira natural e protetora, diminuindo a possibilidade de os aquíferos localizados mais à oeste da área de estudo, serem atingidos por fluxos superficiais e subterrâneos originados do local de descarga dos resíduos sólidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABGE. 1996. *Ensaio de permeabilidade em solos, orientações para sua execução no campo*. 3.ed. S.Paulo, Associação Brasileira de Geologia de Engenharia. (Boletim, 4).
- ABNT. 1997. *ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 13895 Construção de poços de monitoramento e amostragem*. 21p.
- AMINOT, A. & CHAUSSEPIED, M. 1983. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. Centre National pour L'Exploitation des Océans. CNEXO, BNDO Documentation. 395p.
- APHA (American Public Health Association). 1980. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 15 ed. Boston. 1134p.
- BASTOS, R.G.P. 1991. *Mapeamento por método Geofísico das camadas permeáveis na área do Complexo de Destino Final dos Resíduos Sólidos da Região Metropolitana de Belém*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 117p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- BAUMGARTEM, M.G; ROCHA, J.M.; NIENCHESKI, L.F. 1996. *Manual de Análises em oceanografia química*. Rio Grande do sul. 132p.
- CARNEIRO, B.S. & GERALDO. A. V. 2000. *Determinação de clorofila e avaliação da produtividade nos lagos Água Preta e Bolonha*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro Tecnológico. 48p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- CENSA/COSANPA. 1983. *Diagnóstico do estudo urbanístico de proteção sanitária dos lagos Bolonha e Água Preta*. II: Estudo da qualidade de proteção das águas. Belém, Consultoria – Engenharia / Companhia de Saneamento do Pará. 279p.

CETESB. 1978. *Análises físico-químicas de águas: Normalização Técnica*. São Paulo. 320p.

CODEM – COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO DA ÁREA METROPOLITANA DE BELÉM. 1975. *Plano de desenvolvimento da Grande Belém: metodologia, estudos básicos, prognósticos, desenvolvimento e sistema*. Belém, v.1.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). 1986. Resolução Nº 20. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 jul. 11356p.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). 1999. Resolução Nº 257. Ministério do Desenvolvimento Urbano e Meio Ambiente. Diário Oficial República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 jun. 297p.

CPRM, 1997. *Hidrogeologia Conceitos e Aplicações*. Coordenadores: Fernando Antônio Carneiro Feitosa, João Manoel Filho (ed.). Fortaleza, CPRM, LABHIDUFPE. 412p.

DIAS, S. da F. 1991. *Estudo ambiental do Utinga: vida útil do sistema de abastecimento de água de Belém*. Belém. Instituto de Desenvolvimento Econômico Social do Pará. 118p. (Relatório de Pesquisa 19).

DINIZ, T.D. de A.S. 1986. *Característica climática da Amazônia Oriental: Pesquisa sobre utilização e conservação do solo da Amazônia Oriental*. Relatório final do convênio EMBRAPA/CPATU/GTZ. p.3-13 (Belém documentos, 40).

DRISCOLL, G. 1987. *Groundwater and Wells*. 2ed. St. Paul: Johnson Division. 1088p.

EIA/RIMA-SESAN. 1991. *Estudo de Impacto Ambiental Complexo de Destino Final de Resíduo Sólido da Região Metropolitana de Belém*. FADESP. V.1 e 2. 279p.

- FARIAS, E.dos S.; NASCIMENTO, F.S. do; FERREIRA, M.A.A. 1992. *Mapeamento da área Belém-Outeiro*. Estágio de campo III. Relatório Final. Belém, UFPA. 247p.
- FETTER, C.W. 1994. *Applied Hydrogeology*. 3 ed. New Jersey. 691p.
- FOSTER, S.S. & HIRATA, R.C.A. 1993. *Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo, Instituto Geológico. (Boletim, 10).
- FREEZE, A. & CHERY, J.A. 1979. *Groundwater*. New Jersey, Prentice-Hall, Englewood Cliffs. 604p.
- HEATH, R.C. 1989. *Basic Ground-Water Hydrology*. North Carolina., United States Geological Survey Water-Supply Paper 2220. 84p.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística 2000. Resultados do universo do Censo demográfico. *Recenseamento geral do Brasil*. Rio de Janeiro. Disponível em: www.ibge.gov.br. Acesso em: 18/08/2002.
- IDESP. 1980. *Projeto reconhecimento dos recursos naturais da Região Metropolitana de Belém. Reconhecimento hidrogeológico. Anexo I*. Belém, Instituto de Desenvolvimento Econômico Social do Pará. 11p.
- IPEA. 1996. *Indicadores ambientais no Brasil: Aspectos ecológicos, de eficiência e distributivos*. Rio de Janeiro, 104p. (Texto de discussão, 403)
- IPEA & COHAB, 1997. *Relatório ambiental da Região Metropolitana de Belém*. Belém, Governo do Estado do Pará. 261p.
- IPT. 1995. *Lixo municipal, manual de gerenciamento integrado*. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. 279p.

- JACOB, C.E. 1966. Non-steady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions Am. Geophysical Union*, **36**:95-100.
- MATTA, M.A. DA S. 2002. *Fundamentos hidrogeológicos para a gestão integrada dos recursos hídricos da Região de Belém/Ananindeua – Pará, Brasil*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 292p. (Tese de Doutorado).
- MENEZES, L.A. 2000. *Caracterização hidrogeológica na área do Depósito de Lixo do Aurá – Município de Ananindeua-PA*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 93p. (Dissertação de Mestrado).
- MESTRINHO, S.S. 1994. *Fundamentos da vulnerabilidade de aquíferos*. Salvador, Universidade Federal da Bahia. 66p.
- MOREIRA, E. 1966. *Belém e sua expressão geográfica*. Belém, Imprensa Universitária. 212p.
- OLIVEIRA, A.H. 1997. *Metais pesados nos arredores de depósitos de lixo de Belém-PA*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 105p. (Dissertação de Mestrado).
- OLIVEIRA, C.R.L de. 1998. *Avaliação dos teores de compostos nitrogenados em águas do aquífero freático na área do Depósito de Lixo do Aurá – Belém (PA)*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 53p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- OTERO, C.R. 1966. *A problemática do lixo em diferentes aspectos*. Fortaleza. Centro de Treinamento em Desenvolvimento Econômico Regional – CETREDE. 66p. (Dissertação de Mestrado).
- PARÁ. 1995. *Plano diretor de mineração em áreas urbanas, Região Metropolitana de Belém*. Governo do Estado do Pará, Secretaria de Estado de Indústria, Comércio e Mineração. 187p.

- PARISOT, E.H.; GUIGUER Jr., N.; REBOUÇAS, A.C.; CABRAL Jr., D. & DUARTE, U. 1985. *Monitoramento das águas subterrâneas adjacentes ao aterro sanitário de Taubaté (SP) - Primeiros resultados*. Bol. IG-USP. Série Científica, 16:32-45.
- PEREIRA, S.F.; OU Z.Y. & KIMBLE H. J. 1994. Backaction evading measurement for quantum nondemolition detection and quantum optical tapping. *Phys. Rev. Lett.* 72:214 .
- PEREIRA NETO, J.T. 1992. Conceitos modernos de compostagem. In: TÉCNICAS DE TRATAMENTO DE RSU DOMICILIAR URBANO, 1, 1992, Belo Horizonte. *Curso...* Belo Horizonte: ABES. p.77-92.
- PIRATOBA MORALES, G. 2002. *Avaliação ambiental dos recursos hídricos, solos e sedimentos na área de abrangência do Depósito de Resíduos Sólidos do Aurá*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 220p. (Tese de Doutorado).
- PMB, 1997. *Projeto Técnico: Saneamento Ambiental do Complexo de Destino Final de Resíduos Sólidos do Aurá-Belém-PA*. Belém, Prefeitura Municipal de Belém. 340p.
- PNUD. 2001. *Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo*. Disponível em: www.undp.org. Acesso em: 16/03/2001.
- RIBEIRO, H.M.C. 1992. *Avaliação Atual da Qualidade das Águas dos lagos Bolonha e Água Preta, situados na área fisiográfica de Utinga (Belém-PA)*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 204p. (Dissertação de Mestrado).
- SANTOS, E.C. dos. 1991. *Estudo de impacto ambiental do complexo de destino final de resíduos sólidos da Região Metropolitana de Belém*. Belém, Fadesp/Sesan. 427p.
- SAUMA FILHO, M. 1996. *As águas subterrâneas de Belém e adjacentes: Influência da formação Pirabas e parâmetros físico-químicos para medidas de qualidade*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 128p. (Dissertação de Mestrado).

SILVA, R.C.S. 2002. *Aplicação dos métodos geofísicos elétrico e eletromagnético na determinação de unidades sedimentares costeiras tropicais em Bragança, nordeste do Pará*. Belém. Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 55p. (Dissertação de Mestrado).

VIEIRA, L.S. & SANTOS, P.C.T. 1987. *Amazônia: seus solos e recursos naturais*. São Paulo. Agronômica Ceres. 416p.

WORLD HEALTH ORGANIZATION- WHO. 1993. *Guidelines for drinking-water quality*. Draft Manuscript, v. 1-2 , p.1-8.