



Universidade Federal do Pará
Centro de Geociências
Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica

**MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE E ANÁLISE DE
RISCO DE CONTAMINAÇÃO COMO INSTRUMENTOS DE
PROTEÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ÁREAS
INDUSTRIAIS: CASO DA ALBRAS, BARCARENA-PA**

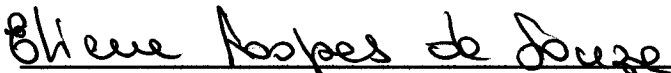
TESE APRESENTADA POR

HOMERO REIS DE MELO JUNIOR

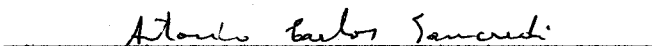
Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em
Ciências na Área de GEOLOGIA.

Data de Aprovação: **05 / 02 / 2002**

Comitê de Tese:


ELIENE LOPES DE SOUZA (Orientador)


RICARDO CESAR AOKI HIRATA


ANTONIO CARLOS FELICE NICOLA SAVERIO
TANCREDI

A Deus, pela luz da vida, com a qual fui abençoado por duas vezes.

***A meus pais, instrumentos Dessa força divina, que me guiaram e
orientaram sempre pelos melhores caminhos.***

A meu irmão, simplesmente, por existir.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à CAPES pelo apoio financeiro concedido através de minha bolsa de mestrado, sem a qual, a realização desta não se tornaria possível;

Ao Curso de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, pela oportunidade em realizar o curso, que apesar de todas as dificuldades, vem despontando como uma referência na pesquisa universitária nacional;

À Industria Alumínio Brasileiro S.A. (ALBRAS) pelo apoio técnico, financeiro e principalmente pela disponibilização para realizar essa dissertação dentro de sua área de disposição de resíduos sólidos, fato este que comprova a exeqüibilidade da parceria entre a empresa privada e instituições de pesquisa, como as universidades públicas;

Dentro da ALBRAS, gostaria de estender minha gratidão às pessoas da Sra. Marylin Souza e do Sr. Welben Ney no Setor de Meio Ambiente, responsáveis diretamente pelo sucesso dessa pesquisa;

Aos amigos do curso de Hidrogeologia, Natalina Cabral, Paulo Pontes e Márcia Tereza Gaspar, pela amizade, pelos conselhos, pela ajuda e por tudo mais que consolidou nossa amizade;

Ao Prof. Antônio Carlos Tancredi, pelos ensinamentos práticos e teóricos, demais valiosos na realização desta;

Aos alunos de graduação Luis Cláudio da Costa e Gisele dos Anjos, pelo apoio nas análises de campo e laboratório;

A todos aqueles que não constam aqui, mas que seguramente encontram-se nas entrelinhas desse trabalho, ao longo de dois anos de convivência e companheirismo;

E finalmente, à minha orientadora, Eliene Lopes de Souza, não somente pela orientação, indispensável; mas pela amizade, determinação e paciência, durante todo esse tempo de trabalho em conjunto, o qual espero que não se encerre com a presente obra.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	i
AGRADECIMENTOS.....	ii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES.....	vi
RESUMO.....	01
ABSTRACT.....	03
1- INTRODUÇÃO.....	05
1.1- APRESENTAÇÃO.....	05
1.2- LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO.....	05
1.3- OBJETIVOS.....	08
1.4- RELEVÂNCIA.....	08
1.5- ASPECTOS FISIOTRÁFICOS.....	10
1.5.1- Clima.....	10
1.5.2- Vegetação.....	11
1.5.3- Geomorfologia.....	11
1.5.4- Solos.....	12
1.6- ASPECTOS SÓCIO-ECONÔMICOS.....	13
1.6.1- Ocupação urbana.....	13
1.6.2- Atividades econômicas.....	14
1.7- GEOLOGIA.....	15
1.7.1- Geologia regional.....	15
1.7.1.1- Formação Pirabas.....	16
1.7.1.2- Grupo Barreiras.....	17
1.7.1.3- Sedimentos Pós-Barreiras.....	19
1.7.2- Geologia local.....	22

1.8- HIDROGEOLOGIA.....	23
1.8.1- Hidrogeologia regional.....	23
1.8.2- Hidrogeologia local.....	24
2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	25
2.1- VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	25
2.2- RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	31
3- METODOLOGIA.....	40
3.1- ESTUDO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO AQUÍFERO LIVRE.....	40
3.1.1- Parâmetros investigados.....	45
3.1.1.1- Profundidade do nível estático.....	46
3.1.1.2- Recarga.....	46
3.1.1.3- Meio aquífero.....	47
3.1.1.4- Topografia.....	47
3.1.1.5- Impacto da zona vadosa.....	48
3.1.1.6- Condutividade hidráulica.....	49
3.2- RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	49
3.3- ESTUDO DA ZONA NÃO SATURADA.....	59
3.3.1- Análises granulométricas.....	60
3.3.2- Testes de infiltração.....	61
3.4- ESTUDO DO AQUÍFERO LIVRE.....	62
3.4.1- Determinação da velocidade do fluxo e elaboração do mapa potenciométrico.....	62
3.4.2- Estimativa de recarga através do balanço hídrico.....	63
4- RESULTADOS OBTIDOS.....	66
4.1- ESTUDO DO AQUÍFERO LIVRE.....	66
4.1.1- Distribuição espacial.....	66
4.1.2- Fluxo subterrâneo	69
4.1.3- Caracterização litológica.....	73
4.1.4- Ensaios de infiltração.....	76

4.2- MAPAS DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO.....	77
Método GOD.....	77
4.2.1- Modelo DRASTIC.....	85
4.2.2.1- Índices DRASTIC.....	86
4.3- CORRELAÇÃO ENTRE AMBIENTES GEOLÓGICOS NA APLICAÇÃO DO MODELO DRASTIC.....	103
4.4- COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS GOD E DRASTIC.....	105
4.5- AVALIAÇÃO DOS RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS.....	108
4.5.1- Avaliação de risco de contaminação na área de disposição.....	108
4.5.2- Fatores de risco.....	109
5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	119
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	122
ANEXO	
ANEXO A – Ficha cadastral de áreas contaminadas.....	129

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1- Localização e vias de acesso da área de estudo.....	pg. 07
Figura 2- Valores de precipitação pluviométrica e evapotranspiração para os anos de 1961-1990 na cidade de Belém.....	pg. 11
Figura 3- Modelo representativo do final da sedimentação Pirabas e sua relação com os depósitos Barreiras, no nordeste do Pará (Góes <i>et al.</i> 1990).....	pg. 17
Figura 4- Modelo deposicional para os sedimentos Barreiras na região Bragantina, nordeste do Estado do Pará.....	pg. 19
Figura 5- Coluna estratigráfica da área estudada.....	pg. 20
Figura 6- Perfil de poço de abastecimento 516-001 da ALBRAS ilustrando os sedimentos que constituem a geologia de subsuperfície da região.....	pg. 21
Figura 7- Parâmetros utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero através do método GOD	pg. 41
Figura 8- Ensaio de rebaixamento para cálculo da condutividade hidráulica na zona não saturada.....	pg. 62
Figura 9- Perfil construído através da correlação entre as sondagens geotécnicas SP-17, SP-18, SP-19 e SP-20, demonstrando a relação de contato entre os Sedimentos Pós-Barreiras e o Grupo Barreiras no local da ADRS.....	pg. 67
Figura 10- Perfil construído através da correlação entre as sondagens geotécnicas SP-21, SP-22, SP-23 e SP-24 demonstrando a relação de contato entre os Sedimentos Pós-Barreiras e o Grupo Barreiras no local da ADRS.....	pg. 68
Figura 11- Gráfico do rebaixamento x tempo (s x t) obtido a partir do teste de bombeamento.....	pg. 70
Figura 12- Localização dos furos de trado, poços de monitoramento e sondagens geotécnicas utilizadas na caracterização litológica.....	pg. 72
Figura 13- Fluxo subterrâneo na ADRS.....	pg. 73
Figura 14- Localização aproximada das perfurações a trado.....	pg. 74

Figura 15- Tipos de aquífero identificados na ADRS.....	pg. 80
Figura 16- Sedimentos inconsolidados da zona não saturada.....	pg. 81
Figura 17- Profundidade do nível estático na ADRS.....	pg. 83
Figura 18- Vulnerabilidade do aquífero livre na ADRS.....	pg. 84
Figura 19- Índices de profundidade do nível estático na ADRS.....	pg. 88
Figura 20- Recarga (Índice R) obtida para a ADRS.....	pg. 93
Figura 21- Meio aquífero (Índice A) identificado e seus respectivos índices na área de disposição de resíduos sólidos.....	pg. 95
Figura 22- Gradiente Topográfico (Índice T) identificado na área de disposição de resíduos sólidos.....	pg. 97
Figura 23- Sedimentos que constituem a zona não saturada (Índice I) na área de disposição de resíduos sólidos.....	pg. 99
Figura 24- Valor obtido para a condutividade hidráulica (Índice C) e seu peso inferido, na área de disposição de resíduos sólidos.....	pg. 101
Figura 25- Vulnerabilidade natural do aquífero livre com o índice final DRASTIC e seus respectivos valores na área de disposição de resíduos sólidos.....	pg. 103
Figura 26- Esquema da aterro de resíduos Classe I – Condições climáticas e hidrogeológicas favoráveis	pg.111

TABELAS

Tabela 1- Níveis plani-altimétricos das unidades de relevo da área.....	pg. 12
Tabela 2- Valores de capacidade específica para os poços que captam aquíferos do Sistema Barreiras.....	pg. 23
Tabela 3- Valores de vazão, transmissividade e coeficiente de armazenamento para os aquíferos do Sistema Barreiras.....	pg. 24
Tabela 4- Principais métodos desenvolvidos para determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, seus objetivos, e os fatores utilizados.....	pg. 27
Tabela 5- Pesos inferidos para os fatores DRASTIC.....	pg. 41
Tabela 6- Profundidade do nível da água e respectivos valores.....	pg. 42
Tabela 7- Taxas de infiltração (recarga) e seus respectivos valores.....	pg. 42
Tabela 8- Litotipos que compõem o aquífero e seus respectivos valores.....	pg. 43
Tabela 9- Tipos de solo e seus respectivos valores.....	pg. 43
Tabela 10- Inclinação do relevo e seus respectivos valores.....	pg. 43
Tabela 11- litotipos que constituem a zona vadosa e seus respectivos valores.....	pg. 44
Tabela 12- Condutividade hidráulica e seus respectivos valores.....	pg. 44
Tabela 13- Sistema de pontuação adotado por Hassuda	pg. 51
Tabela 14- Valores de Mn e Rn para o componente Ra1 (Tipo e volume de resíduos do local de disposição).....	pg. 52
Tabela 15- Valores de Mn e Rn para o componente Ra2 (Grupo de substâncias que podem ser encontradas).....	pg. 52
Tabela 16- Valores de Mn e Rn para a componente Rb1 (ar).....	pg. 53
Tabela 17- Valores de Rn e Mn para a Componente Rb2 (Águas Subterrâneas).....	pg. 54
Tabela 18- Valores de Mn e Rn para a componente Rb3 (Águas superficiais).....	pg. 55
Tabela 19- Valores de Mn e Rn para a componente Rb4 (solo).....	pg. 56

Tabela 20- valores de Mn e Rn para a componente Rc (Bens a proteger).....	pg. 58
Tabela 21- Totalização do sistema de pontuação para o risco de contaminação.....	pg. 59
Tabela 22- Caracterização granulométrica predominante dos sedimentos dos furos a trado.....	pg. 75
Tabela 23- Valores de condutividade hidráulica (K) em cm/s para alguns materiais geológicos	pg. 75
Tabela 24- Furos a trado e propriedades utilizadas nos ensaios de rebaixamento na ADRS.....	pg. 76
Tabela 25- Valores da condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de infiltração nas perfurações a trado PT7, PT10 e PT11.....	pg. 76
Tabela 26- Parâmetros utilizados para determinar a vulnerabilidade na ADRS e seus respectivos pesos, através do método GOD.....	pg. 78
Tabela 27- Valores do Nível Estático com seus respectivos valores do peso (Dp), dos valores atribuídos (Dc) e do índice da profundidade (Dp x Dc).....	pg. 86
Tabela 28- Parâmetros utilizados para a determinação da Evapotranspiração Real na Região Metropolitana de Belém através da metodologia desenvolvida por Thonrtwaithe & Mather	pg. 89
Tabela 29- Valores da recarga com seus respectivos valores do peso (Rp), dos valores atribuídos (Rc) e do índice da recarga (Rp x Rc).....	pg. 92
Tabela 30- Valores do meio aquífero com seus respectivos valores do peso (Ap), dos valores atribuídos (Ac) e do índice do meio aquífero (Ap x Ac).....	pg. 94
Tabela 31- Valores dos índices topográficos com seus respectivos valores do peso (Tp), dos valores atribuídos (Tc) e do índice da topografia (Tp x Tc).....	pg. 96
Tabela 32- Valores da zona vadosa com seus respectivos valores do peso (Ip), dos valores atribuídos (Ic) e do índice da profundidade (Ip x Ic).....	pg. 98

Tabela 33- Valores da condutividade hidráulica com seus respectivos valores do peso (Cp), dos valores atribuídos (Cc) e do índice da condutividade hidráulica ($C_p \times C_c$).....	pg. 100
Tabela 34- Parâmetros utilizados e pesos atribuídos para determinar a vulnerabilidade natural do aquífero livre na ADRS através do método DRASTIC.....	pg. 102
Tabela 35- Parâmetros utilizados com os respectivos valores do Índice DRATIC na Formação Ogallala.....	pg. 105
Tabela 36- Valores de Rn e Mn para o componente Ra1 utilizados na ADRS.....	pg. 110
Tabela 37- Valores de Rn e Mn para o componente Ra2 adotados na ADRS e o valor total do componente Ra.....	pg. 111
Tabela 38- Índices adotados para o componente Rb2 na ADRS.....	pg. 113
Tabela 39- Índices adotados para o componente Rc1 na ADRS.....	pg. 114
Tabela 40- Índices adotados para o componente Rc2, e o valor final obtido para o índice Rc fora da ADRS.....	pg. 116
Tabela 41- Esquema de pontuação adotado para calcular o risco de contaminação, e os valores finais obtidos na ADRS.....	pg. 118

RESUMO

O trabalho foi realizado na Área de Disposição de Resíduos Sólidos (ADRS) da Industria Alumínio Brasileiro S.A. (ALBRAS), no município de Barcarena, Estado do Pará, norte do Brasil. Seu objetivo foi determinar as principais características físicas do aquífero livre, a sua vulnerabilidade natural à contaminação, bem como os riscos de contaminação do aquífero considerado.

O conhecimento da hidrogeologia local apoiou-se em perfurações a trado manual, análises granulométricas do material coletado nessas perfurações, ensaio de bombeamento, além da interpretação de perfis de sondagens geotécnicas.

A vulnerabilidade natural do aquífero foi determinada através dos métodos GOD e DRASTIC, fundamentada em diversos parâmetros como profundidade da água, tipo de aquífero, características litológicas da zona não saturada, condutividade hidráulica dos sedimentos, recarga do aquífero e topografia. Na avaliação do risco de contaminação do local foram considerados os riscos aos bens a proteger (recursos naturais e saúde pública).

O aquífero estudado é do tipo livre, sem cobertura, sendo a zona não saturada constituída por sedimentos areno-siltosos a areno-silto-argilosos, inconsolidados, de coloração amarelo-creme a alaranjado chegando a cinza claro, mal selecionados e sub-angulosos, apresentando condutividade hidráulica da ordem de 10^{-4} cm/s. No período de maior intensidade de chuvas, a profundidade do nível estático variou entre 0 e 5,1 metros. A transmissividade, obtida através de teste de bombeamento de curta duração, foi de 43,92 m²/dia. Por fim, a recarga do aquífero apresentou taxa de infiltração média de 115,58 mm/ano.

A vulnerabilidade do aquífero livre, determinada através do método GOD variou entre moderada e alta; enquanto que, pelo modelo DRASTIC, foram obtidos índices de vulnerabilidade entre 128 a 151. Embora esses números não indiquem nenhum valor intrínseco, eles podem ser interpretados através da comparação com valores de índices DRASTIC obtidos em outras áreas. Como os valores desse índice variam entre 65 a 223 para todos os ambientes hidrogeológicos típicos, para os quais o método foi desenvolvido nos Estados Unidos; pode-se considerar que, a vulnerabilidade natural do aquífero estudado através do modelo DRASTIC também apresenta valores moderados

(118) a altos (141). Para determinar a vulnerabilidade natural do aquífero livre em ² áreas de pequena extensão como a investigada, o método GOD apresentou maior exeqüibilidade em relação ao Índice DRASTIC por utilizar um menor número de parâmetros; uma vez que, elementos como litotipo da zona saturada, recarga, condutividade hidráulica apresentam pouca ou nenhuma variação em uma área com cerca de 5 km², pouco influenciando portanto no índice de vulnerabilidade final. A pontuação final obtida para avaliar o risco de contaminação mostrou-se abaixo do valor crítico de 200.

ABSTRACT

This work was made in the Solid Waste Disposal Site (SWDS) at the Alumínio Brasileiro S.A. Industry (ALBRAS), in the town Barcarena, State of Pará, Northern Brazil. The principal objective was to find the main physical properties of the unconfined aquifer its natural vulnerability to contamination and the risk of contamination of the studied aquifer.

To know and understand the local hydrogeology, were made manual bore holes, grain size analyses and a pumping test, were made as well as interpretation of geotechnical bores profiles.

The natural vulnerability of the unconfined aquifer was determined by the GOD and DRASTIC methods, based basically on water depth, type of aquifer, lithology, characteristics of non-saturated zone, hydraulic conductivity, topography and aquifer recharge. The local assessment of contamination risk considered the risks to environmental resources and public health.

The studied aquifer is unconfined, and the vadose zone consists of unconsolidated silty-sand, silty-sand-clay sediments, with creamy yellow and orange till light gray colors, badly sorted and sub-angled. The hydraulic conductivity is approximately 10^{-4} cm/s. In the rainy season the water level reached from 0 to 5,1 meters depth. The transmissivity, obtained by pumping test of short time, is estimated in 43.92 m²/day. The net recharge showed an infiltration rate of 115.58 mm/year.

The unconfined aquifer vulnerability, obtained through the GOD method, ranged between high and moderated levels; and by the DRASTIC model, the vulnerability index ranged between 118 and 141. Although these numbers do not imply an intrinsic value, they could be extrapolated by the comparison with DRASTIC index of others regions. The index of all hydrogeologic environments studied by the method authors in the United States range between 65 and 223. Therefore we can consider the index of the current study area moderated (128) until high (151), considering the environment constituted by unconsolidated sediments. The natural groundwater vulnerability assessment in areas with small extension as in SWDS was better

applied throughout the GOD Method than by the DRASTIC Indexes, mainly⁴ because the first one apply less parameters than the second one; e.g. litology of non-saturated zone, recharge net and hydraulic conductivity, which show little or any difference in its values in an area with 5 km², presenting not very important for the final vulnerability indexes. The final value obtained for the risk contamination was bellows the critic index of 200.

1- INTRODUÇÃO

1.1- APRESENTAÇÃO

O estudo e a preservação dos recursos hídricos têm sido assunto de pouco interesse no Brasil, principalmente nas regiões norte e nordeste. Nesta última, a água, devido à relativa escassez, sempre foi motivo de conflitos e concentração de poder e renda, enquanto que na região Amazônica, a água vem sendo tratada com pouco caso pelas autoridades e pela população devido à sua grande abundância.

No Pará, poucos órgãos governamentais realizaram estudos sobre água subterrânea até os dias de hoje, o que caracteriza o descaso das autoridades com este recurso natural que poderia ser a principal fonte de abastecimento em grande parte de nosso estado, devido à sua qualidade e disponibilidade. Para tanto, é necessário estudos voltados para a caracterização dos aquíferos visando a melhor proteção destes.

Este trabalho, procura determinar a vulnerabilidade e o risco de contaminação do aquífero livre, na região do Distrito Industrial de Barcarena, na área da Indústria Alumínio Brasileiro S. A. (ALBRAS), situada nas bacias hidrográficas dos rios Pará e Guamá. Essa determinação fundamentou-se nas principais características hidrogeológicas locais, como profundidade do nível estático, tipo de aquífero, litotipo das zonas saturada e não saturada, condutividade hidráulica, topografia e recarga do aquífero, assim como nos tipos de resíduos dispostos na área. Através dessas informações foram produzidos os mapas de vulnerabilidade e obtida uma pontuação de risco para o aquífero livre da área em questão.

1.2- LOCALIZAÇÃO E VIAS DE ACESSO

O município de Barcarena localiza-se entre as latitudes 1°30' e 2°00' S e as longitudes 48°30' e 49°00' W de Greenwich, perfazendo uma área de cerca de 180 km². A vila dos Cabanos, que corresponde ao núcleo urbano da ALBRAS, localiza-se a cerca de 20 km de Belém, sendo o acesso feito por barcos regulares para a vila de São Francisco, seguindo de ônibus até o núcleo urbano, ou através de balsa, que atravessa a baía do Guajará até o porto do Arapari, de onde se pode seguir pelas rodovias PA-151 e PA-483. Através dessas rodovias também se alcança a Área de Disposição dos

Resíduos Sólidos (ADRS) da ALBRAS, localizada entre as instalações da Eletronorte⁶
e a Área de Proteção Ambiental (Figura 1).

1.3- OBJETIVOS

Essa dissertação, tem como um dos objetivos principais o mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre localizado na Área de Disposição de Resíduos Sólidos (ADRS) da ALBRAS. Objetiva-se igualmente, avaliar os riscos que a disposição dos resíduos oferece para os recursos naturais da área, particularmente as águas subterrâneas, associando desta forma as características de proteção natural do ambiente hidrogeológico com a atividade antrópica exercida no local. A utilização dos métodos GOD (Foster & Hirata 1993) e DRASTIC (Aller *et al.* 1987) no mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero teve como objetivo a comparação entre ambos, avaliando-se as diferenças obtidas, quando utilizados em escala de detalhe. Procurou-se ainda constatar a aplicabilidade dos mesmos em trabalhos desenvolvidos em nossa região, onde as dificuldades de obtenção de dados são freqüentes. Finalmente, procurou-se por em prática a aplicação do método DRASTIC, bastante difundido na Europa e nos Estados Unidos, porém, pouco aplicado até o momento no Brasil.

1.4- RELEVÂNCIA

O complexo industrial de Barcarena é formado por uma fábrica de alumínio (ALBRAS), pela usina de alumina que abastece as cubas eletrolíticas (ALUNORTE) e por uma empresa de exploração de caulim (Rio Capim Caulim – RCC). Os processos industriais existentes na região produzem rejeitos que podem liberar fluoreto, cloreto, sulfato, bicarbonato, entre outras substâncias que, em contato com a água, tendem a causar alterações significativas em sua qualidade. Além disso, o tratamento de efluentes pode aumentar os teores de alguns íons metálicos, como ferro e chumbo (Lima & Kobayashi 1986). Nessa área, portanto, a atividade industrial exercida constitui um fator de risco para a qualidade das águas superficiais e subterrâneas. Esse risco estaria associado a eventuais vazamentos de tanques e encanamentos, derrames acidentais de substâncias tóxicas, lagoas de efluentes, lixiviado de resíduos sólidos; entre outros fatores. Apesar das grandes indústrias ali instaladas já se preocuparem com o quadro ambiental, buscando soluções adequadas para que não haja contaminação dos recursos naturais, faz-se necessário avaliar até que ponto essas medidas são realmente seguras, através de uma metodologia cientificamente

comprovada, identificando assim, os riscos de contaminação que a atividade industrial exercida na área possa representar tanto para os recursos naturais, quanto para a população local.

No caso de Barcarena, os estudos supracitados, se tornam ainda mais importantes, uma vez que ali os aquíferos livres podem servir de fontes de contaminação para os aquíferos semiconfinados; fato este, verificado na região pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT 1984), onde foram identificados dois sistemas aquíferos: um aquífero superior (livre com cobertura) composto por matriz arenosa fina a média, e espessura variável; e um aquífero inferior (semiconfinado), formado por matriz arenosa grosseira, heterogênea, com espessura constante. De acordo com os dados do IPT (1984), o bombeamento do aquífero inferior causa uma infiltração vertical descendente das águas do aquífero superior através da camada semiconfinante. No entanto, essas condições não devem corresponder a todo o sistema aquífero da região de Barcarena, devido a grandes descontinuidades laterais, demonstrando que o aquífero inferior é bastante heterogêneo e anisotrópico.

Vale ressaltar que trabalhos anteriores foram realizados com o objetivo de avaliar o grau de vulnerabilidade dos aquíferos da região, a exemplo do desenvolvido por Soares (1998). Nesse caso, o autor enfocou uma área ampla, abrangendo o município de Barcarena, assim como seu Distrito Industrial e as localidades mais próximas; onde foram utilizados essencialmente, perfis de poços de abastecimento existentes no Distrito Industrial, tendo sido aconselhada a realização de estudos mais detalhados.

Em trabalho de conclusão de curso de graduação, Rodrigues (1999) procedeu um estudo preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre da área de disposição de resíduos sólidos (ADRS).

O presente trabalho constitui uma ampliação e o aprofundamento dos estudos iniciados por Rodrigues (1999) gerando dados que possibilitam à ALBRAS adotar medidas preventivas, visando a proteção da qualidade das águas nas áreas em torno de fontes potenciais de contaminação.

Vale ressaltar que estudos enfocando a determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos são quase que inexistentes na região norte do Brasil, destacando-se os de Soares (1998) e Rodrigues (1999) na região de Barcarena, já citados, e o de Tancredi

(1996) na região de Santarém-PA. Por sua vez, trabalhos científicos tratando da avaliação de riscos de contaminação das águas subterrâneas em áreas de disposição de resíduos industriais, nunca foram desenvolvidos por instituições de pesquisa em nossa região, fato este que denota a importância da presente dissertação.

1.5– ASPECTOS FISIOGRAFICOS

1.5.1 – Clima

A região de Barcarena possui clima quente e úmido, com temperatura média anual de 27°C e, de acordo com a classificação de Köppen (*apud* Nascimento 1995), o clima da região é de floresta tropical úmida da classe Afi (A – clima tropical chuvoso com temperatura média do mês mais frio superior a 18° C; f – ocorrência de chuvas durante todo o ano, em que o mês de menor cota pluviométrica alcança 60 mm; i – não há variação de estação sensível, pois a oscilação anual da temperatura média é menor que 5° C).

A precipitação pluviométrica apresenta média anual acima de 2500 mm, sendo que o período mais chuvoso vai de dezembro a maio, atingindo as maiores taxas de precipitação em março, com valores de até 425 mm. No período seco, que vai de junho a novembro, a precipitação encontra-se abaixo de 110 mm durante o mês de agosto. A umidade relativa do ar é superior a 85% ao longo de todos os meses do ano (BRASIL 1974).

De acordo com os dados de evapotranspiração obtidos para a cidade de Belém (Figura 2), considerados similares aos da região de Barcarena, devido à sua proximidade, observa-se que entre os meses de janeiro a maio os valores de precipitação são muito maiores que os de evaporação.

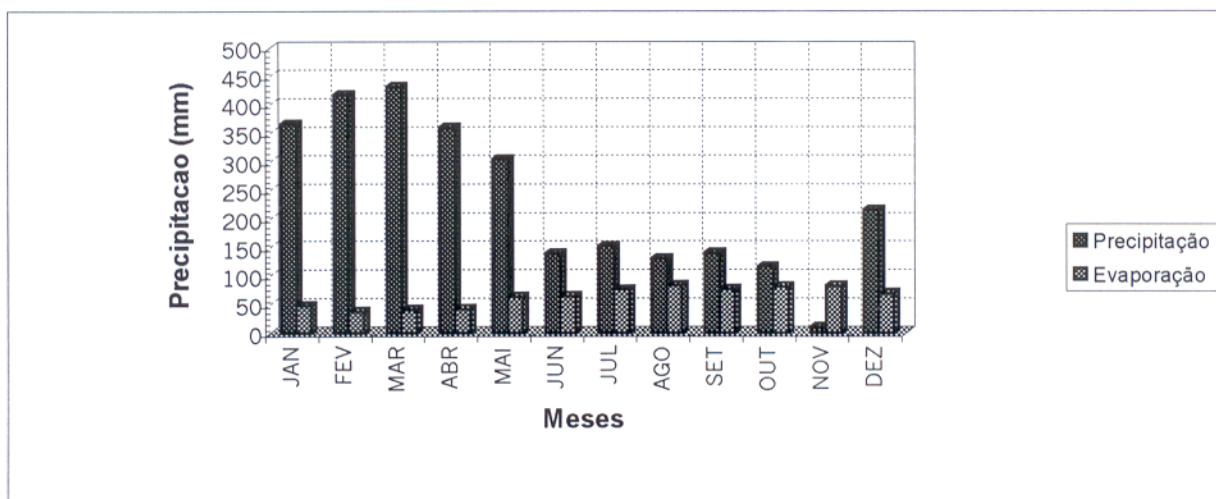


Figura 2- Valores de precipitação pluviométrica e evapotranspiração para os anos de 1961-1990 na cidade de Belém (INMET 1992).

1.5.2 – Vegetação

Na região, a cobertura vegetal está relacionada aos fatores geomorfológicos, climáticos e antrópicos, sendo identificadas predominantemente três tipos: vegetação de floresta densa, nas áreas pediplanares mais elevadas; b) vegetação de várzea, típica de áreas inundáveis; c) florestas secundárias, denominadas de “capoeira”. Ocorrem, ainda, florestas ciliares, localizadas nos baixos cursos dos rios e igarapés; além da vegetação de mangue, que margeia os rios e as ilhas adjacentes (BRASIL 1974).

1.5.3- Geomorfologia

A região de Barcarena é composta por três (3) unidades geomorfológicas (RIMA Albrás/Alunorte *apud* Rodrigues 1999): a) Terras Firmes, compostas por terrenos terciários que não sofrem qualquer ação das águas dos rios e marés, caracterizados pela escassez de drenagem e por apresentar altitudes que variam entre 10 a 30m; b) Tesos ou terraços, áreas planas ou levemente inclinadas, resultantes do processo de erosão fluvial ao longo dos rios, não susceptíveis a inundações, sendo caracterizados pela presença de drenagens e pela variação de altitude de 5 a 12 m; c) Várzeas, que são terrenos baixos e relativamente planos, junto às margens dos rios, subdivididos em

áreas alagáveis periodicamente, caracterizadas por restingas e cordões arenosos com altitudes que variam de 3 a 12 m; e áreas alagadas constantemente, representadas por igapós e lagos com altimetria variando de 0 a 3 m.

A topografia da região foi caracterizada como suavemente ondulada a plana, demonstrada nitidamente pelos cinco padrões altimétricos que caracterizam o relevo, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Níveis plani-altimétricos das unidades de relevo da área.

NÍVEL ALTIMÉTRICO (m)	UNIDADE
0 – 3	Várzea Baixa
3 – 5	Várzea Alta
5 – 12	Terraços ou Tesos
12 – 15	Falésia do Rio Pará
10 – 15	Terras Firmes

1.5.4 – Solos

Barcarena possui 3 tipos de solos predominantes: o Latossolo Amarelo Distrófico, o Podzol Hidromórfico e o Concrecionário Laterítico (BRASIL 1974).

O Latossolo Amarelo Distrófico (LAd) é desenvolvido em rochas do Grupo Barreiras, formado em relevo plano, sob floresta densa, e encontra-se muito espesso, maduro, com textura média muito argilosa, alta capacidade de troca iônica, baixo conteúdo de carbono orgânico, alta saturação em alumínio, baixo conteúdo de fósforo assimilável e alto conteúdo de fósforo total.

O Podzol Hidromórfico é composto por sedimentos arenosos, predominantemente quaternários.

O Concrecionário Laterítico (CL) é formado em superfícies planas ou suavemente onduladas e sob floresta densa, consistindo em solos argilosos ou argilo-arenosos, com presença de concreções ferruginosas, medianamente espessos.

Os solos também podem ser subdivididos em relação às unidades geomórfologicas, as quais encontram-se condicionados. Nas terras firmes o solo apresenta profundidade média de 3 metros, textura arenosa e níveis de húmus, sendo fortemente lixiviado e com pH ácido. Nos tesos, o solo possui profundidade de 3 metros,

textura arenosa, poucos níveis de húmus, é fortemente lixiviado e com pH ácido. Por sua vez, o solo das várzeas tem espessura variável, textura argilo-arenosa, mostra-se forte a moderadamente lixiviado e o seu pH varia com os níveis de inundação (BRASIL 1974).

1.6- ASPECTOS SÓCIOECONÔMICOS

1.6.1- Ocupação urbana

A região de Barcarena é formada pela cidade de Barcarena, pelo complexo industrial e a vila dos Cabanos, além das localidades de São Francisco, vila Nova, vila de Itupanema e vila do Conde.

O complexo industrial de Barcarena compreende as áreas de domínio da ALBRAS e da ALUNORTE, do porto de vila do Conde, da subestação da ELETRONORTE, da Rio Capim Caulim (RCC); além de áreas de expansão da ALBRAS e ALUNORTE e da área de preservação ambiental.

A vila dos Cabanos tem como principal objetivo dar apoio urbano ao projeto ALBRAS/ALUNORTE, sendo que o núcleo foi projetado com uma geometria adequada às condições ambientais da região. O abastecimento de água é feito através de poços tubulares, sendo a água primeiramente bombeada para um reservatório e posteriormente distribuída para a rede predial. O esgoto sanitário é canalizado através de coletores que atuam por gravidade em direção ao lago, onde são interceptados e levados à estação de tratamento que, por sua vez, encontra-se à jusante da barragem do rio Murucupi, que corta o núcleo urbano (IDESP 1991).

A localidade de São Francisco encontra-se às margens do rio Barcarena, tendo passado por um acelerado crescimento populacional desde a implantação do complexo industrial, atingindo um total de cerca de 1500 habitantes em 1989. Essa localidade é habitada predominantemente por pessoas de baixas condições sócioeconômicas, havendo ainda alguns pequenos estabelecimentos comerciais. O abastecimento de água é feito através da rede pública e de poços escavados nos quintais das casas, em condições sanitárias inadequadas (IDESP 1991).

A vila Nova situa-se à margem direita da baía do Marajó, próximo da vila de Itupanema, tendo sido criada para assentar as famílias desapropriadas pela

implantação do complexo ALBRAS/ALUNORTE. Os loteamentos possuem sistema de abastecimento de água de rede pública e poços escavados. Esta localidade não possui sistema de saneamento apropriado, a não ser a presença de fossas sépticas localizadas no fundo dos lotes, gerando problemas ambientais e sanitários. Existe ainda o problema da coleta de lixo que é inadequada ou ausente (IDESP 1991).

A vila de Itupanema localiza-se na margem direita da baía do Marajó. É anterior ao projeto ALBRAS/ALUNORTE e não sofreu aumento populacional devido à implantação do complexo industrial. A população local sobrevive em função da caça, pesca, extrativismo vegetal e cultivo de pequenas lavouras. Itupanema dispõe de sistema de abastecimento de água, havendo porém, um número considerável de residências com poços escavados, além da inexistência da rede de esgoto sanitário. Para a coleta dos esgotos sanitários foram construídas fossas dentro das propriedades, o que compromete a qualidade da água dos poços construídos sem as devidas especificidades técnicas (IDESP 1991).

A vila do Conde, localizada à margem direita do rio Pará, foi fundada no século XVII e permaneceu como um vilarejo até o início da década de 70, sendo habitada exclusivamente por lavradores e pescadores. Porém, com a instalação do complexo industrial houve um crescimento urbano desenfreado, atingindo a rodovia PA-483 a leste, e o igarapé Dendê a sul. A parte mais antiga da vila possui rede de esgoto que despeja seus efluentes diretamente nas praias do rio Pará.

1.6.2– Atividades econômicas

As principais atividades econômicas da região são a indústria, a agricultura e o extrativismo.

A atividade industrial é significativa, devido à presença de indústrias de grande porte, como a ALUNORTE, que processa a bauxita em alumina e produziu aproximadamente 800.000 ton. em 1999; e a ALBRAS, que processa a alumina em alumínio, pretendendo atingir uma produção estimada em 406.000 ton. em 2002. No entanto, essa atividade engloba uma parcela mínima da população local.

As atividades com maior envolvimento dos habitantes da região referem-se às culturas extrativistas, à agricultura de subsistência, à pesca e à caça.

Vale ressaltar o turismo, como um novo empreendimento que tem crescido muito nos últimos anos na região, devido à grande diversidade de praias existentes, destacando-se as do Caripí, de vila do Conde e Itupanema. Essa atividade será ainda mais ampliada a partir de setembro de 2002, com a conclusão das obras da Alça Viária, que consiste na construção de um conjunto de quatro pontes que ligarão Belém à região de Barcarena e ao sul do Estado, facilitando ainda mais o acesso às localidades turísticas.

1.7- GEOLOGIA

1.7.1- Geologia regional

A região de Barcarena apresenta em seu arcabouço geológico sedimentos inconsolidados do Grupo Barreiras, composto por areias, siltes e argilas, de coloração cinza amarelada e espessura de até 100 metros, apresentando concreções lateríticas, inseridos no Mioceno Superior. Ocorrem ainda sedimentos quaternários inconsolidados, areno-siltosos, de coloração creme amarronzada, e espessura máxima de 12 metros, que constituem os Sedimentos Pós-Barreiras.

Apesar da Formação Pirabas não ter sido identificada na região de Barcarena até a profundidade de 250m, devido à proximidade com a Região Metropolitana de Belém, onde esta unidade foi encontrada entre 70 a 90m de profundidade, admite-se que essa formação também ocorre na área, porém a profundidades maiores do que aquelas encontradas em Belém (Soares 1998). Um fato observado durante a execução dessa dissertação foi a considerável espessura do Grupo Barreiras na região de Barcarena, que chega a atingir cerca de 250 metros de profundidade; ao passo que, até o momento nenhuma ocorrência da Formação Pirabas foi registrada. No entanto, na região de Belém, o Grupo Barreiras não ultrapassa 100 metros de profundidade, sendo identificada logo abaixo a Formação Pirabas. Este fato pode ser explicado pela presença de um feixe de falhas normais de direção NW – SE, mergulhando para NE, que geraram o rebaixamento da região de Belém e o soerguimento da parte mais a oeste do Estado, durante o processo de abertura do Atlântico no Cretáceo, gerando a baía do Marajó, conforme descrito por Costa *et al.* (1996).

1.7.1.1- Formação Pirabas

Descrita inicialmente por Maury (1925), a Formação Pirabas aflora principalmente na região nordeste do Estado do Pará, sendo constituída por rochas carbonáticas, depositadas durante o Mioceno Inferior (Góes *et al.* 1990).

Com base em testemunhos fósseis de foraminíferos, Petri *apud* Góes *et al.* (1990) foi o primeiro a dividir esta unidade, classificando-a em três biofácies: Castelo, Canecos e Baunilha Grande; descritas na Zona Bragantina e no furo Baunilha Grande, ambas no litoral paraense. Esta mesma seqüência foi posteriormente adotada por vários autores, sendo feitas apenas algumas pequenas modificações. Somente Ferreira *apud* Góes *et al.* (1990) apresentou nova coluna estratigráfica, denominando da base para o topo as fácies Castelo, Baunilha Grande e Capanema (fácies Canecos de Petri), sendo esta coluna posteriormente modificada por muitos outros autores.

Góes *et al.* (1990), no entanto, observaram que as subdivisões litofaciológicas apresentadas para esta formação não possuem posicionamento estratigráfico único e que não são restritas geograficamente, havendo intercalações entre as fácies Castelo, Baunilha Grande e Capanema. A partir daí, sugeriram um modelo deposicional preliminar para a unidade, além de relacioná-la com os sedimentos do Grupo Barreiras.

Através da análise faciológica, Góes *et al.* (1990) identificaram sete fácies descritivas e, através de suas interrelações espaciais, interpretaram os diversos subambientes que originaram a Formação Pirabas. As fácies descritas pelos autores foram: biocalciruditos, biocalcarenitos estratificados, biocalcarenitos não estratificados, margas e, mais localmente, biohermitos, folhelhos negros e verdes, além de calcilutitos.

Considerando o conteúdo fóssilífero da Formação Pirabas, Góes *et al.* (1990) determinaram que esta formou-se em ambiente marinho aberto, de águas quentes, rasas e agitadas, havendo ainda porções lagunares ou estuarinas e, localmente, mangues adjacentes.

A transição da Formação Pirabas para os Sedimentos Barreiras ocorreu gradativamente (Arai *et al. apud* Góes *et al.* 1990). A figura 3 ilustra o processo de sedimentação da Formação Pirabas e a sua estreita relação com os sedimentos Barreiras, sendo difícil até mesmo denotar o processo divisor entre ambos. Através deste modelo, pode-se inferir que a deposição terrígena proximal Barreiras ocorreu

sobre uma superfície discordante, gerada pela movimentação tectônica que favoreceu a elevação da taxa de sedimentação, podendo ter havido, portanto, uma certa contemporaneidade entre a fase final de sedimentação Pirabas e o início da deposição Barreiras, ao menos localmente.

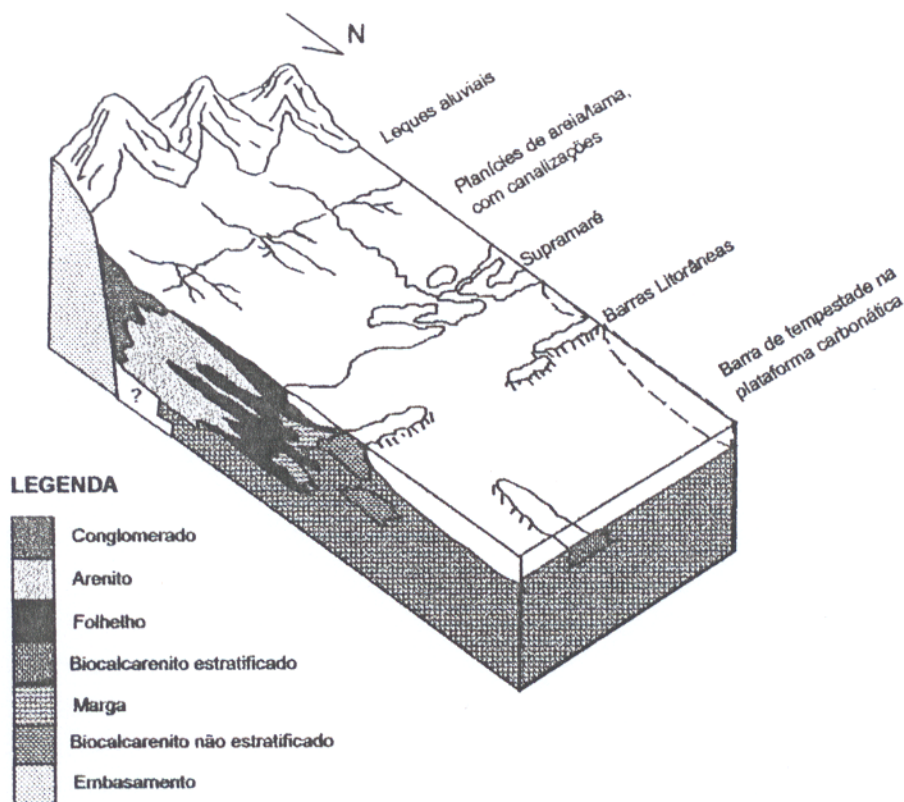


Figura 3- Modelo representativo do final da sedimentação Pirabas e sua relação com os depósitos Barreiras, no nordeste do Pará (Góes *et al.* 1990).

1.7.1.2- Grupo Barreiras

Os sedimentos conhecidos por Barreiras correspondem a uma extensa seqüência siliciclástica cenozóica, que ocorre desde o Rio de Janeiro até as proximidades da foz do Amazonas, em uma estreita faixa paralela à costa brasileira. A partir do final da década de 70, diversos autores passaram a trabalhar nesta unidade; como Bossi *et al.*, Alheiros *et al.* e Rosseti *et al.* *apud* Rosseti *et al.* (1990), os quais abordaram, principalmente, o modelo deposicional. Por sua vez, Arai *et al.* *apud* Rosseti *et al.* (1990) e Góes *et al.* *apud* Rosseti *et al.* (1990) investigaram respectivamente, a idade máxima dos sedimentos e a sua relação com as demais unidades cenozóicas.

Diferentemente do que tem sido registrado na literatura, Rosseti *et al.* (1989) descreveram treze fácies para essa unidade, definidas principalmente em função das estruturas sedimentares presentes ou não, além dos aspectos texturais.

Baseando-se na análise faciológica, Rosseti *et al.* (1989) concluíram que o modelo deposicional do Grupo Barreiras assemelha-se muito ao modelo proposto por Hubert & Hyde para a Formação Blomidon, localizada na Nova Escócia e pertencente ao Triássico Superior. Este modelo estabelece um sistema do tipo leques aluviais-planície de areia-planície de lama (*alluvial fan-sandflat-playa system*) onde rápidas inundações ocorrentes em climas áridos e semi-áridos fazem com que a água se mova através dos canais ativos de um leque, se estendendo então distalmente, sob a forma de fluxos em lençóis (*sheet-flow*), os quais podem atingir até a planície de lama. Na suavização do declive, que corresponde à passagem dos leques aluviais para as planícies de areia, ocorre queda da velocidade com conseqüente deposição de sedimentos pelíticos laminados plano-paralelamente. De acordo com este modelo, os fluxos de desaceleramento tiveram alta concentração de carga em suspensão, como fica evidenciado pela freqüente presença de camadas argilosas. A figura 4 ilustra o processo deposicional proposto por Rosseti *et al.* (1990) para o Grupo Barreiras na região nordeste do Estado do Pará.

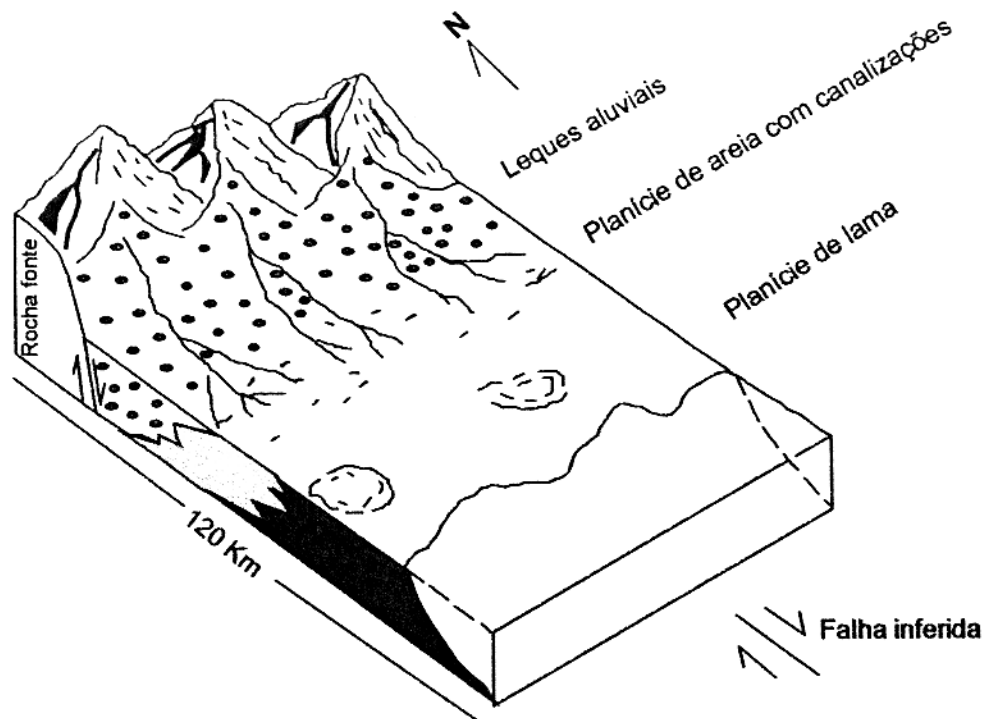


Figura 4- Modelo deposicional proposto para os sedimentos Barreiras na região Bragantina, nordeste do Estado do Pará (Rosseti *et al.* 1989).

1.7.1.3- Sedimentos Pós-Barreiras

A denominação Pós-Barreiras foi proposta por Silva & Loewenstein *apud* Farias *et al.* (1992) para designar os sedimentos amarelados sobrepostos ao Grupo Barreiras e que correspondem ao Quaternário Antigo, de Katzer e Ackermann, e à Formação Pará, de Oliveira & Leonardos *apud* Farias *et al.* (1992).

Os sedimentos Pós-Barreiras foram descritos por Sá *apud* Farias *et al.* (1992) como sedimentos areno-argilosos de granulometria fina a grossa, vermelho a amarelados, inconsolidados, compostos predominantemente por quartzo e uma fração silte/argila inferior a 25%. Encontram-se ainda seixos e blocos rolados ou pouco movimentados de arenito ferruginoso. Estão em discordância erosional sobre o Grupo Barreiras exibindo contato marcado por seixos rolados de arenito ferruginoso, ou ainda fragmentos dos sedimentos Barreiras.

Segundo Rosseti *et al.* (1989), o Pós-Barreiras corresponde à fácies argilo-arenosa de Góes & Truckenbrodt (1980), geralmente maciça e caracterizada por arenitos argilosos, mal selecionados com grânulos e até seixos de quartzo dispersos.

Geralmente não se distinguem estruturas, embora nas proximidades do litoral sejam observadas estruturas de dissipação de dunas eólicas.

Simões *apud* Farias *et al.* (1992) obteve a datação de 5200 anos para os sedimentos Pós-Barreiras, baseado em concentrações residuais de conchas inseridas nesse pacote.

A coluna estratigráfica da área estudada encontra-se detalhada na figura 5, enquanto que, o perfil de um dos poços de abastecimento da ALBRAS, ilustrado na figura 6, apresenta os sedimentos que compõem a geologia de subsuperfície da região.

Era	Período	Época	Idade (Ma)	Unidade Estratigráfica	Descrição
Cenozóico	Quaternário	Holoceno	0,005	Sedimentos Pós-Barreiras	Sedimentos areno-argilosos de granulometria fina a grossa, vermelho a amarelados, inconsolidados, compostos predominantemente por quartzo e fração argilo-siltosa inferior a 25%.
	Terciário	Mioceno-Plioceno	5,2	Grupo Barreiras	Camadas de areia, silte e argila inconsolidados; concreções lateríticas; espessos pacotes argilosos; argilitos maciços; arenitos finos, argilosos; siltitos; argilitos dispostos em lâminas com estrutura wavy e linsen; areia fina; arenitos grossos e seixos; conglomerados mal selecionados imersos em matriz areno-argilosa.
		Mioceno Inferior	23,3	Formação Pirabas	Rochas carbonáticas, predominando biocalciluditos, biocalcarenitos estratificados, biocalcarenitos não estratificados, margas e, localmente biohermitos, folhelhos negros, folhelhos verdes e calciluditos.

Figura 5- Coluna estratigráfica da área estudada.

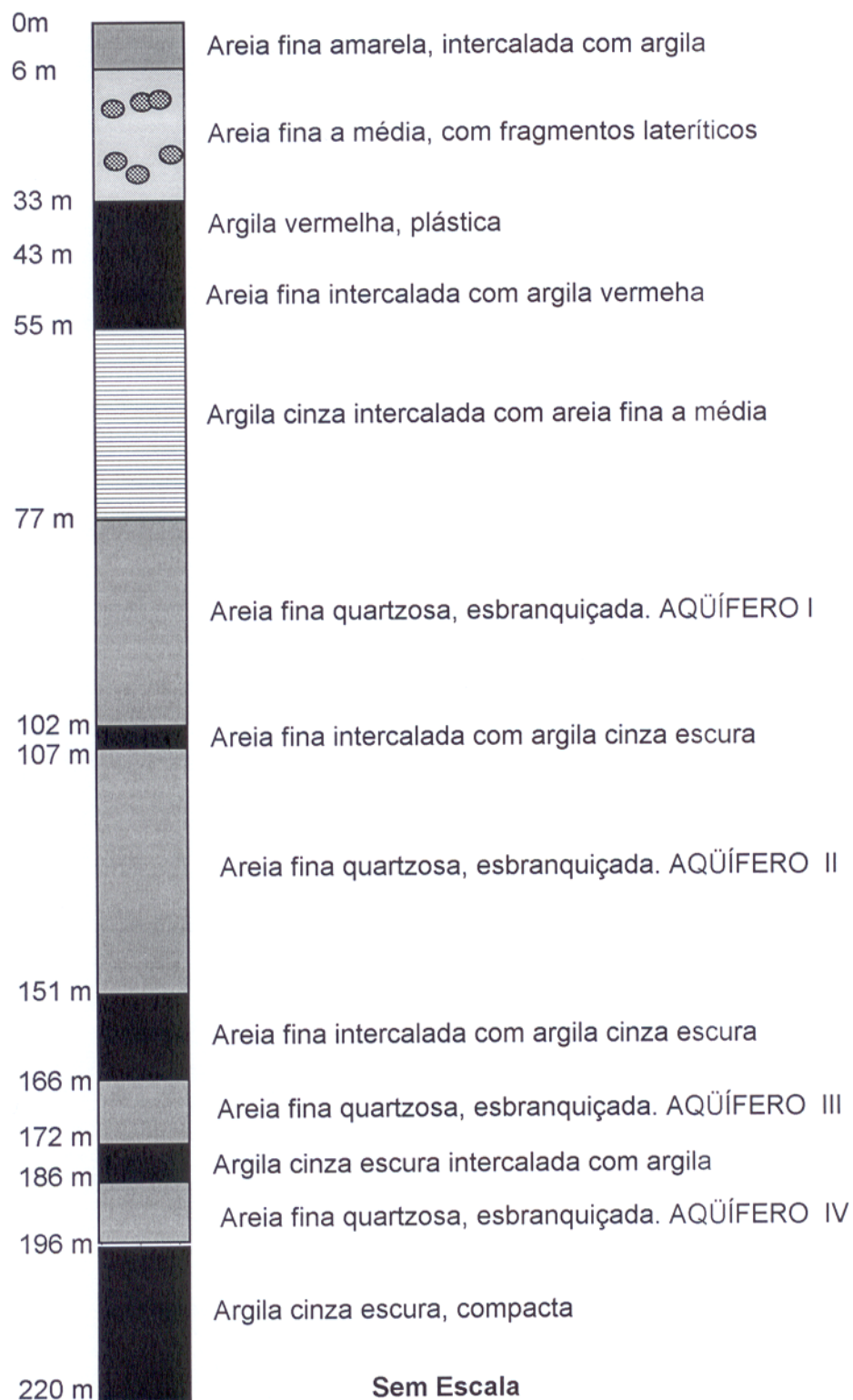


Figura 6- Perfil do poço de abastecimento 516-001 da ALBRAS ilustrando os sedimentos que constituem a geologia de subsuperfície da região.

1.7.2- Geologia local

Através de perfurações a trado manual, executadas durante o presente trabalho, além de sondagens geotécnicas realizadas durante a implantação da ALBRAS e perfilagens geofísicas de poços de monitoramento, foram identificados na área de disposição dos resíduos sólidos (ADRS), tanto em superfície como em subsuperfície, materiais terrígenos cujas características litológicas permitem associá-los aos Sedimentos Pós-Barreiras. Esses sedimentos inconsolidados são constituídos por areias finas a médias silto-argilosas, de coloração creme a amarelo-alaranjada, pobremente selecionados, contendo algumas vezes cascalhos esparsos e intercalados a algumas lenticulas argilosas de coloração vermelha, mosqueada e cinza, que localmente recobrem os sedimentos arenosos. A espessura desses sedimentos varia entre 2 a cerca de 20 metros.

No perfil do poço de abastecimento 516-002 (Figura 6), situado na área da fábrica de alumínio, foram identificados a partir de 18 metros de profundidade, sedimentos constituídos essencialmente por espessas lentes argilosas intercaladas a camadas de areia, as quais compõem o sistema aquífero Barreiras, principal fornecedor de água para abastecimento da indústria local. No entanto, para o presente trabalho, foram enfocados os sedimentos Pós-Barreiras, que constituem o aquífero livre, objetivo da presente dissertação.

1.8- HIDROGEOLOGIA

1.8.1- Hidrogeologia regional

Os aquíferos livres da região de Barcarena são constituídos por sedimentos aluvionares quaternário e por sedimentos terciários do topo do Grupo Barreiras. Os primeiros são compostos por areias, areias argilosas, argilas arenosas e siltes, ocorrendo até 10 metros de profundidade. Os aquíferos do topo do Grupo Barreiras possuem espessuras máximas de 15 metros e pequena continuidade lateral, estando localmente cobertos por camadas de argila, silte, argila arenosa e areia argilosa (IPT 1984).

Os aquíferos do sistema Barreiras apresentam maior capacidade de produção para abastecimento, com testes de produção de poços indicando vazões de até 450 m³/h para os poços profundos e vazões em torno de 290 m³/h para os poços menos profundos (IPT 1984). Por sua vez, a capacidade específica dos poços nessa unidade apresenta valores entre 1,4 m³/h/m a 17,5 m³/h/m. As tabelas 2 e 3 apresentam os valores desses parâmetros além da transmissividade e do coeficiente de armazenamento para os aquíferos do sistema Barreiras.

Pode-se identificar, portanto, a presença de um sistema aquífero semi-confinado por camadas argilosas, compostos por uma matriz arenosa fina a média e com espessura variável. Outro sistema aquífero, apresenta matriz arenosa heterogênea grosseira e espessura relativamente constante (Soares 1998).

Tabela 2- Valores de capacidade específica para os poços que captam aquíferos do sistema Barreiras (Picanço 1999).

Nível Estático (m)	Profundidade Captada (m)	Capacidade Específica (m ³ /h/m)	Tempo de Bombeamento (h)
0,80	87 - 16	2,4	8
3,70	16 - 28	1,4	24
24,0	41 - 58	17,5	24
6,80	70 -78	5,0	26

Tabela 3- Valores de vazão, transmissividade e coeficiente de armazenamento para os aquíferos do sistema Barreiras (IPT 1984).

	Vazão (m³/h)	Transmissividade (m²/h)	Coeficiente de Armazenamento (x 10⁻⁴)
Aquífero Superior	260	19,86	4,65
Aquífero Inferior	450	56,47	2,8

1.8.2- Hidrogeologia local

De acordo com os dados do IPT (1984), na região de Barcarena os aquíferos livres são formados por sedimentos aluvionares quaternários, compostos por areias, areias argilosas, argilas arenosas e siltes, ocorrendo até 10 metros de profundidade. Foi observado ainda através das perfurações a trado manual, dos perfis de sondagens geotécnicas e dos poços de monitoramento, que a zona não saturada do aquífero livre encontra-se entre 1,6 a 5,2 metros de profundidade no período de maior incidência de chuvas, sendo que, a profundidade total do aquífero varia entre 5,6 a 19 metros. Também ocorrem na área, aquíferos livres, formados por sedimentos terciários do topo do Grupo Barreiras, com espessuras máximas de 15 metros e pequena continuidade lateral, localmente cobertos por camadas de argila, silte, argila arenosa e areia argilosa.

Através do perfil de um poço tubular com cerca de 250 metros de profundidade fornecido pela ALBRAS, os sedimentos do Grupo Barreiras foram identificados como o principal sistema aquífero para abastecimento de água subterrânea da região, tanto para consumo residencial, como para utilização nas indústrias. Os aquíferos consistem em areias finas a grossas, com espessuras entre 3 a 20 metros, intercalados por camadas de argila avermelhada com espessura entre 1 e 10 m, as quais constituem aquícludes.

No contexto deste trabalho, os aquíferos do sistema Pós-Barreiras são os de maior interesse, já que a área de disposição de resíduos sólidos (ADRS) está localizada sobre esses sedimentos. Além disso, uma eventual contaminação desses aquíferos poderia vir a afetar os sistemas mais profundos, uma vez que, segundo o estudo desenvolvido na área pelo IPT (1984) os aquíferos do Pós-Barreiras e Barreiras estão

hidraulicamente conectados. Assim sendo, no presente trabalho investigou-se, especificamente, o aquífero livre constituído pelos sedimentos Pós-Barreiras.

2- REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1- VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

O conceito inicial de vulnerabilidade das águas subterrâneas foi originalmente definido na França, como “vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação” por Margat *apud* Vrba & Zoporozec (1994), e o termo tem sido quase sempre utilizado em relação à contaminação dos aquíferos. Porém, esse conceito não está relacionado somente aos aspectos de contaminação ou de qualidade das águas, podendo-se incluir também os aspectos quantitativos.

A idéia de descrever diversos graus de vulnerabilidade das águas subterrâneas em relação a cargas contaminantes, como função das condições hidrogeológicas locais, através de mapas, foi concebida como um esforço em criar consciência do perigo de contaminação das águas subterrâneas Margat *apud* Vrba & Zoporozec (1994). A visualização fornecida pelos mapas provou ser uma maneira eficiente de ilustrar as informações de uma área. Para isso, inicialmente, os mapas foram baseados nos principais fatores hidrogeológicos como profundidade do nível da água, permeabilidade dos depósitos superficiais, conexão entre o solo e o nível freático, e a velocidade média do fluxo subterrâneo Margat & Suaes-Parascandola *apud* Vrba & Zoporozec (1994). Nestes casos, a interpretação das condições hidrogeológicas em relação à vulnerabilidade era puramente qualitativa, não levando em consideração os processos de migração dos contaminantes superficiais em direção às águas subterrâneas.

Apesar do conceito de vulnerabilidade ter sido desenvolvido há mais de três décadas, ainda não há um consenso no que diz respeito ao seu reconhecimento e aceitação. Uma das primeiras definições encontradas na literatura é a de Albinet & Margat *apud* Vrba & Zoporozec (1994). Segundo esses autores, a vulnerabilidade de um aquífero seria a possibilidade de percolação e difusão de contaminantes superficiais nos níveis freáticos, sob condições naturais. Por sua vez, Olmer & Rezác *apud* Vrba & Zoporozec (1994) sugeriram que a vulnerabilidade das águas subterrâneas seria “o

grau de risco, determinado pelas condições naturais, independente das fontes de poluição presentes". Segundo os autores, a vulnerabilidade na zona não saturada depende da permeabilidade vertical enquanto que, no aquífero, depende do gradiente hidráulico e da velocidade do fluxo subterrâneo.

Vrána *apud* Vrba & Zoporozec (1994) definiu vulnerabilidade como "as complexas condições naturais de superfície e subsuperfície de influenciarem o movimento dos poluentes em direção ao aquífero".

Villumsen *et al. apud* Vrba & Zoporozec (1994) classificaram como vulnerabilidade das águas subterrâneas "o risco de substâncias químicas usadas ou dispostas sobre ou próximo à superfície do terreno influenciarem a qualidade das águas subterrâneas". De acordo com esses autores, a vulnerabilidade depende de uma série de parâmetros, tanto estáticos como dinâmicos.

Em trabalhos apresentados na *International Conference on Vulnerability of Soils and Groundwater to Pollutants*, realizado em 1987, alguns autores propuseram definições diretas, outros apenas indicaram os fatores nos quais deveria basear-se a vulnerabilidade das águas subterrâneas.

Foster (1987) apresentou uma definição baseada no risco de contaminação das águas subterrâneas, considerando a interação entre a vulnerabilidade natural de um aquífero e a carga contaminante que é, ou será, aplicada ao ambiente como resultado da atividade humana. O autor utilizou o termo "vulnerabilidade à poluição do aquífero" para representar as características intrínsecas que determinam a sensibilidade de várias partes de um aquífero a ser adversamente afetado por uma carga contaminante imposta.

A combinação da susceptibilidade do aquífero à contaminação somada às características dos contaminantes aparecem, portanto; nas últimas definições de vulnerabilidade natural das águas subterrâneas.

Palmquist *apud* Vrba & Zoporozec (1994) definiu a vulnerabilidade como "uma medida de risco das águas subterrâneas através das atividades humanas associadas com a presença de contaminantes" concluindo que "sem a presença de contaminantes, mesmo as águas subterrâneas mais susceptíveis não estão sujeitas a risco, e assim, não são vulneráveis". O autor incluiu tanto a susceptibilidade das águas subterrâneas a

possíveis contaminações, como os tipos e quantidades de potenciais contaminantes como partes essenciais da vulnerabilidade.

Adams & Foster (1992) definiram a vulnerabilidade de um aquífero à contaminação como sendo uma função da a) acessibilidade da zona não saturada, no sentido hidráulico, à penetração de contaminantes, b) capacidade de atenuação dos estratos sobrejacentes à zona saturada como resultado da retenção físico-química ou reação dos contaminantes. Esses dois fatores interagem com o modo de disposição dos contaminantes, a magnitude da carga hidráulica associada e a classe de contaminantes, em termos de sua mobilidade e persistência.

O Comitê de Técnicas para Determinação da Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas do Conselho Norte-Americano de Pesquisa *apud* Vrba & Zoporozec (1994) diferenciou dois tipos gerais de vulnerabilidade: específica, referindo-se a um contaminante específico, classe de contaminante ou atividade humana; e vulnerabilidade intrínseca, que não considera as características e o comportamento dos contaminantes específicos.

A Tabela 4 mostra os principais métodos de determinação da vulnerabilidade das águas subterrâneas desenvolvidos até hoje, e os objetivos a que se propõem.

Tabela 4- Principais métodos desenvolvidos para determinar a vulnerabilidade das águas subterrâneas, seus objetivos e os fatores utilizados (Hirata 1994).

MÉTODO	TIPO DE AVALIAÇÃO	FATORES	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA
SURFACE IMPOUNDMENT ASSESMENT	Sistemas de deposição de águas servidas	-zona não saturada -importância do recurso -qualidade das substâncias -periculosidade do material	Le Grand (1964)
LANDFILL SITE RATING (Método Le Grand-Brown)	Aterros sanitários novos e em operação	-distância aterro/poços -profundidade d'água -gradiente do aquífero	Le Grand (1964)
SITE RANKING SYSTEM	Disposição de produtos químicos novos e em operação	-solo, características hidráulicas, sorção e tamponamento químico -hidrodinâmica do aquífero -ar -população próxima	Hargerty <i>et al.</i> (1973)
POLUIÇÃO DOS LENÇÓIS AQUÍFEROS	Vulnerabilidade geral	-geologia (litologia e estrutura)	Taltasse (1972)
WASTE-SOIL INTERACTION MATRIX	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e	-efeitos na saúde -características do produto	

	novas indústrias	químico -comportamento do produto -capacidade do solo (atenuação) -hidrogeologia -características do local	Philips <i>et al.</i> (1977)
SITE RATING METHODOLOGY	Disposição de resíduos sólidos e líquidos e novas indústrias	-receptor-população/uso da água/uso local/degradação ambiental -caminhos-nível e tipo de contaminação; profundidade da água; pluviometria; permeabilidade do solo -características dos resíduo-toxicidade, persistência prática manejo/operação	Kulfs <i>et al.</i> (1980)
TPE	Áreas de risco de contaminação	-velocidade da água subterrânea -porcentagem de argila da zona não saturada -atividade potencial /contaminante -exploração dos aquíferos	Silva <i>et al.</i> (1980)
HAZARD RANKING SYSTEM	Áreas prioritárias para ação de limpeza do aquífero	-migração-característica do meio e resíduo: quantidade produto; proximidade da população -explosão e fogo -contato direto	Caldwell <i>et al.</i> (1981)
MAPA DE VULNERABILIDADE	Vulnerabilidade universal	-características litológicas -áreas de recarga e descarga	Duarte (1980)
BRINE DISPOSAL METHODOLOGY	Águas de formação de campos de petróleo e gás	-método de disposição -volume -geologia -densidade de poços -proximidade de poços de água	Western Michigan University (1981)
PESTICIDE INDEX	Pesticidas de uso normal	-características físico-químicas do pesticida -climatologia -perfil do solo -tipo de cultura	Rao <i>et al.</i> (1985)
DRASTIC	Vulnerabilidade geral	-D profundidade da água -R recarga -A meio aquífero -S solo -T topografia -I impacto no aquífero -C condutividade hidráulica	Aller <i>et al.</i> (1987)
GOD	Vulnerabilidade geral	-G tipo de aquífero -O litologia da zona vadosa -D profundidade da água	Foster & Hirata (1993)

GROUNDWATER VULNERABILITY MAP FOR NITRATE	Vulnerabilidade para nitrato da atividade agrícola	-tipo de solo -características hidrogeológicas litológicas do aquífero e	Palmer (1988)
POTENTIAL WASTE SITES (PWDS)	Disposição de resíduos sólidos	-vulnerabilidade -confinamento do aquífero -proximidade de fontes -tipo e quantidade de poluentes	BGS (Sem data)
RISCO POR SISTEMAS DE SANEAMENTO <i>IN SITU</i>	Avaliar áreas de maior risco por sistemas de saneamento <i>in situ</i>	-vulnerabilidade (GOD) -densidade da população -análise de indicadores físico-químicos (CE)	Ferreira & Hirata (1993)

O Grupo de Águas subterrâneas da Comunidade Econômica Européia realizou um congresso em 1991, no Instituto das Águas Europeu em Bruxelas, com o propósito de estabelecer um acordo internacional sobre metodologias em comum para a elaboração de um inventário sobre os recursos hídricos subterrâneos para todos os Estados Membros da Comunidade Econômica Européia. Semelhante ao inventário feito no passado, entre os anos de 1979 e 1981, para todos os países membros da CEE na ocasião. Um novo levantamento se fazia necessário devido à existência de novos Estados Membros, como Espanha, Portugal e a Alemanha unificada. Ficou decidido no congresso, que era preciso a uniformização dos critérios e procedimentos utilizados por cada Estado Membro a fim de avaliar, *rankiar*, e mapear as águas subterrâneas. As vantagens dessa uniformização seriam:

- a) mapas gerados em um país seriam facilmente entendidos por todos;
- b) mapas de diferentes países seriam comparáveis, podendo ser postos juntos para cobrir regiões transfronteiriças e multinacionais;
- c) o diálogo entre os profissionais de várias nações seria facilitado e era desejado que cada país tomasse benefícios das experiências adquiridas pelos demais, e;
- d) seria possível criar uma base de dados compatível e coerente que incluiria dados para todos os Estados Membros da CEE, sempre que possível, baseado na experiência acumulada no projeto CORINE da CEE.

Como alguns dos sistemas de *rankiamento* e avaliação da vulnerabilidade incluem índices de vulnerabilidade, os quais são computados de características hidrológicas,

geomorfológicas e outras bem definidas dos aquíferos, a adoção de um índice tem a vantagem de, em princípio, eliminar ou minimizar a subjetividade do processo de *rankiamento*. Dado o número de autores e de usuários em potencial dos mapas de vulnerabilidade, Lobo-Ferreira & Cabral (1991) sugeriram que um índice unificado de vulnerabilidade fosse adotado no *ranking* de vulnerabilidade de todos os mapas da CEE. Seria uma padronização similar aquela adotada nos Estados Unidos, Canadá e África do Sul, que atualmente utilizam o Índice DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para a Agência Ambiental dos EUA. Este método apresenta características simples, mas ao mesmo tempo úteis.

Em 1995, o Laboratório Nacional de Engenharia Civil de Portugal (LNEC) publicou um série de três volumes, contendo uma coletânea de 11 relatórios. O estudo foi desenvolvido pela Diretoria Geral da Comissão Europeia de Meio Ambiente, Segurança Nuclear e Proteção Civil, além de muitas autoridades portuguesas, como a Direção-Geral do Ambiente (DGA) (Lobo-Ferreira *et al.* 1999).

O principal objetivo do projeto foi desenvolver um "Inventário dos Recursos Hídricos de Portugal", incluindo:

- caracterização dos sistemas hidrogeológicos;
- avaliação dos recursos hídricos subterrâneos, tanto os renováveis como a recarga dos aquíferos, como as partes explotáveis das reservas subterrâneas;
- avaliação do uso das águas subterrâneas;
- mapeamento em escala de 1:50.000, através de um Sistema de Informação Geográfico (GIS), os sistemas hidrogeológicos, a recarga subterrânea e a vulnerabilidade naturais das águas subterrâneas à contaminação através dos índices do método DRASTIC, incluindo os sete parâmetros necessários para sua avaliação, e;
- análise através da legislação internacional para zoneamento e proteção das águas subterrâneas;
- implementação futura, no arcabouço do projeto, da primeira base de dados em português dos parâmetros qualitativos e quantitativos das águas subterrâneas,

desenvolvido pelo LNEC, programado e preenchido por dados de mais de 6000 locações de poços.

No Brasil, Taltasse (1972) foi o primeiro autor a desenvolver estudos de vulnerabilidade, propondo um mapa para o município de Campinas (SP) considerando a susceptibilidade das unidades litoestratigráficas a um evento qualquer de contaminação. O autor considerou a condutividade hidráulica das formações e as características de sorção do material, sendo o produto final, um mapa baseado na geologia da área.

Trabalhos desenvolvidos pelo DAEE-TAHAL-CETESB (*apud* Hirata 1994) no vale do Paraíba (SP) analisaram a condutividade hidráulica e o teor de argila dos materiais em superfície, definindo os locais de menor tempo de trânsito de percolação de líquidos na zona vadosa, correspondentes às zonas mais vulneráveis. Anos depois, as mesmas instituições desenvolveram trabalhos similares nas áreas de afloramento do aquífero Botucatu e no município de Ribeirão Preto (CETESB *apud* Hirata 1994).

Já na década de 80, Duarte (1980) elaborou o mapa de vulnerabilidade dos aquíferos freáticos considerando a zona de recarga e a caracterização do material contaminante, de acordo com os vários litotipos e solos. Alguns anos depois, Duarte & Kanehisa (*apud* Hirata 1994) desenvolveram um método para selecionar áreas de disposição de efluentes líquidos domésticos, através de sistemas de saneamento *in situ* (fossas sépticas, secas e úmidas), considerando a vulnerabilidade natural dos aquíferos.

Nos últimos anos, o Instituto Geológico da Secretaria do Meio Ambiente em convênio com a CETESB e o DAEE desenvolveram o projeto de "Mapeamento da vulnerabilidade e risco da poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo" em escala 1:500.000 (Hirata *et al.*, 1991; Hirata, 1993), tendo sido utilizado o método GOD, desenvolvido por Foster & Hirata (1988).

No Ceará, objetivando estimar a vulnerabilidade natural dos aquíferos porosos da região norte da bacia hidrográfica do rio Mundaú, no litoral oeste do Estado do Ceará, Leite & Möbus (1998) empregaram a metodologia baseada no índice DRASTIC, com algumas modificações em função dos conhecimentos de campo. Para tal, foram

considerados: profundidade do nível estático, meio aquífero, topografia, impacto na zona vadosa e cobertura vegetal.

Na Região Amazônica, trabalhos que visam caracterizar a vulnerabilidade natural dos aquíferos são ainda escassos e insuficientes para o tamanho e a complexidade da região. Nesse âmbito, destaca-se a tese de doutoramento de Tancredi (1996) que estudou os recursos hídricos subterrâneos da região de Santarém, enfocando entre outras características a vulnerabilidade dos aquíferos locais.

Fica claro portanto, que em uma região como a Amazônia, onde o conhecimento hidrogeológico é tão escasso, é necessário a aplicação de métodos de mapeamento da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas, mesmo que em escala reduzida como a do presente estudo. Essa necessidade se torna mais evidente quando o objetivo final é conhecer o ambiente de subsuperfície a fim de avaliar o risco de contaminação associado com atividades industriais consideradas danosas ao meio ambiente, e/ou indicar novas áreas para a disposição dos resíduos provenientes da indústria da alumínio. Deve-se considerar que mesmo em uma área de pequena extensão como a investigada, podem haver significativas variações em importantes propriedades físicas do ambiente hidrogeológico. Entre estas podem ser citadas a condutividade hidráulica da zona vadosa, que pode variar espacialmente tanto em função de diferentes sistemas de uso do solo como em função de variações granulométricas, seja horizontal ou vertical; a profundidade do nível freático que pode variar em função da topografia. Além do mais, lentes argilosas podem encontrar-se interdigitadas ao sistema aquífero, alterando suas propriedades hidráulicas ou um espesso manto de intemperismo pode recobrir um paleocanal o qual pode ser utilizado como fonte de abastecimento para uma comunidade. Enfim, muitas são as possibilidades de variação em um ambiente geológico de subsuperfície, de modo que o conhecimento detalhado deste se faz necessário quando encontra-se em jogo não só a proteção ambiental, como a saúde e a vida da população local.

2.2- RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

A análise de risco de contaminação é, uma ferramenta utilizada para estimar o perigo que um determinado resíduo perigoso pode representar para a saúde humana e

o meio ambiente em determinadas situações. É igualmente utilizada para a tomada de decisões, para a definição de ações e metas de remediação e para a avaliação de áreas contaminadas (La Grega *et al.* *apud* Maximiano *et al.* 2000).

Segundo a USEPA (*apud* Maximiano *et al.* 2000), o processo de análise de risco, em linhas gerais, possui quatro etapas definidas: a coleta e a avaliação de dados, a análise da exposição, a análise da toxicidade e a caracterização do risco.

Um fato que deve ser destacado quanto ao risco de contaminação, tanto das águas subterrâneas, como dos recursos naturais em geral, é que o conceito de carga potencial poluidora refere-se à atividade humana que poderá gerar poluição e alterar a qualidade das águas subterrâneas acima dos padrões de potabilidade. É, portanto, um conceito associado a risco e não indica que a atividade, no momento em que se realiza, esteja causando dano a um aquífero específico. Uma atividade classificada como de elevado potencial não significa, necessariamente, que seja agressiva ao meio ambiente, ou que não utilize modernas técnicas de tratamento de seus resíduos; pois na verdade, em muitos casos, o risco de geração de contaminação está associado ao próprio manuseio de produtos perigosos, aos acidentes e aos vazamentos. Para a avaliação de risco, a carga poluidora é seguramente a que apresenta maior dificuldade em ser estimada. Por isso, Aller *et al.* (1987) idealizaram uma classificação dos aquíferos, de acordo com o potencial natural à contaminação, em ordem crescente, sendo:

- a) Folhelho maciço - folhelhos acamadados espessos, argilitos ou argilas que fornecem geralmente pequenas quantidades de água através de suas fraturas, apresentam baixo potencial de contaminação, sendo este potencial relacionado diretamente ao grau de fraturamento da rocha;
- b) Rochas ígneas/metamórficas - rochas consolidadas de origem ígnea ou metamórfica com pouca ou nenhuma porosidade primária e que fornecem água somente através de suas fraturas. Geralmente apresentam baixo potencial de contaminação, estando este também ligado ao grau de fraturamento da rocha;
- c) Rochas ígneas/metamórficas intemperizadas - materiais inconsolidados, conhecidos por regolito ou saprólito, derivados do intemperismo das rochas consolidadas subjacentes e que contêm porosidade primária. Apresentam uma relação muito

próxima entre o teor de argila do material e o potencial de contaminação do aquífero; logo, quanto maior a quantidade de material argiloso, menor o potencial de contaminação do aquífero;

- d) Til glacial - misturas inconsolidadas ou semi-consolidadas de cascalho, areia, silte e argila, pobremente selecionados e estratificados. Embora os tills glaciais apresentem baixa permeabilidade, os poços construídos nesse material são tipicamente rasos, logo, mais susceptíveis à contaminação;
- e) Arenito acamadado, Calcário e Folhelho - geralmente ocorrem como seqüências de rochas sedimentares finamente acamadadas, contendo porosidade primária. O fator que mais influencia no potencial de contaminação é o grau de fraturamento das rochas;
- f) Arenito maciço - arenitos consolidados que possuem tanto porosidade primária como secundária. Apresentam o potencial de contaminação relacionado tanto ao grau de fraturamento como à porosidade primária;
- g) Calcário maciço - calcários ou dolomitos maciços compostos por espessos depósitos. Apresentam o potencial de poluição relacionado ao grau de fraturamento e ao volume de cavidades de dissolução no calcário;
- h) Areia e cascalho - misturas inconsolidadas de areia e cascalho com pequenas quantidades de material fino, sendo conhecidos como limpos. Em geral, quanto menos limpos e mais grosseiro o aquífero, maior será o potencial de contaminação;
- i) Basalto - nesse tipo de rocha ígnea extrusiva, com planos de acamamento, fraturas e porosidade vesicular, o potencial de poluição é influenciado pela quantidade de aberturas interconectadas presentes no material do fluxo da lava;
- j) Calcário cárstico - o calcário consolidado é dissolvido ao ponto que cavidades largas, abertas e interconectadas encontram-se presentes, além de fraturas. Nesse caso, o potencial de contaminação é muito elevado;

Como a zona vadosa ou não saturada apresenta um papel fundamental na atenuação de contaminantes, Aller *et al.* (1987) classificaram o litotipo da zona não saturada, com base no potencial de contaminação das águas subterrâneas, em ordem crescente, como sendo:

- a) Camada confinante – representa um meio impermeável que restringe o movimento da água dentro do aquífero;
- b) Silte/Argila – um depósito desses materiais, atua como barreira, retardando o movimento dos líquidos. O alto teor de argila fornece um baixo potencial à contaminação. Porém, argilas que apresentam gretas de contração, além de altas concentrações de silte aumentam o potencial de contaminação;
- c) Rochas ígneas/metamórficas – quando apresentam porosidade primária significativa, essas rochas permitem o movimento dos líquidos através das fraturas estando, portanto, o potencial de contaminação relacionado ao grau de fraturamento;
- d) Folhelhos – o potencial à contaminação é baixo, mas aumenta com o grau de fraturamento;
- e) Calcários – o potencial de poluição é influenciado pelo grau de fraturamento e pelo teor de cavidades geradas por dissolução das fácies carbonáticas;
- f) Arenitos – apresenta potencial de contaminação influenciado pelo grau de fraturamento e pela porosidade primária do arenito;
- g) Calcários acamadados, arenitos, folhelhos – nessas seqüências sedimentares tipicamente finas e acamadadas, o fator determinante de controle do potencial de contaminação é o grau de fraturamento;
- h) Areias e cascalhos com teor de silte e argila significativo – esses materiais apresentam permeabilidade e potencial de contaminação reduzidos, quando comparados a depósitos com pouco material fino;
- i) Areias e cascalhos – a mistura desses sedimentos inconsolidados, com pequeno teor de partículas finas, apresenta o potencial de contaminação relacionado ao tamanho dos grãos. Os depósitos mal selecionados, mas com partículas menores, apresentarão o potencial de contaminação inferior ao de depósitos formados por grãos mais grosseiros;
- j) Basalto – essa rocha ígnea extrusiva é portadora de planos de acamamento, fraturas e porosidades vesiculares, estando o seu potencial de contaminação relacionado ao volume de aberturas interconectadas presentes nos materiais do

fluxo da lava que deram origem à rocha e ao sistema de fraturas, o que eleva, em muito, o seu potencial de contaminação;

h) Calcário cárstico – esse tipo de rocha pode ser dissolvido, gerando grandes aberturas interconectadas, além da presença de sistemas de fraturas. Nesses casos, o potencial de contaminação é bastante elevado, estando condicionado ao número de áreas abertas dentro da rocha.

Como já foi mencionado anteriormente, para uma área apresentar algum potencial à contaminação, se faz necessário a presença de uma atividade potencialmente contaminante. De acordo com IG/CETESB/DAEE (1997) e Ferreira *et al.* (2000), as principais geradoras potenciais de carga contaminante em subsuperfície são as atividades urbanas, industriais e a extração mineral. É fundamental a divisão entre contaminação por fontes pontuais (que são mais fáceis de se identificar) e por fontes dispersas. Dentre as fontes pontuais, destacam-se as causadas por atividade industrial, disposição de resíduos sólidos domiciliares, atividade de mineração e lagoas de efluentes domiciliares. Dentre as fontes dispersas, vale destacar como a mais constante em grandes centros urbanos, as atividades de saneamento *in situ* (áreas residenciais não atendidas por rede de coleta de esgotos) (Ferreira *et al.* 2000).

Em relação à atividade industrial, o método proposto pelo IG/CETESB/DAEE (1997) determina que sejam consultados cadastros com inventários de geração de resíduos sólidos e efluentes industriais, sendo que os principais fatores considerados na determinação do risco de contaminação compreendem:

- indústrias que armazenam ou manuseiam produtos ou substâncias corrosivas e tóxicas, tal como descritos na NBR 10.004 (ABNT *apud* Ferreira *et al.* 2000);
- indústrias que geram resíduos perigosos de acordo com a NBR 10.004;
- indústrias que infiltram resíduos no solo;
- indústrias que armazenam e/ou dispõem inadequadamente sobre o solo resíduos classe II em quantidade superior a 100 ton/mês.

Para avaliar a geração de carga poluidora nestas indústrias, o método adota a análise do processo industrial, que considera, fundamentalmente, as seguintes variáveis:

- tipo de matéria-prima;

- natureza e quantidade dos resíduos sólidos;
- forma de estocagem;
- forma de disposição dos resíduos líquidos (em lagoas), resíduos sólidos (em aterros ou no pátio da indústria- disposição transitória) e manuseio de substâncias perigosas.

As variáveis mencionadas devem ser avaliadas a partir do preenchimento dos dados cadastrais, para embasar a análise em um diagrama de classificação aplicado por Ferreira *et al.* (2000). O resultado desta análise define a classificação das indústrias de acordo com o seu potencial de geração de carga poluidora, em elevado, moderado ou reduzido.

O procedimento para a análise do diagrama de classificação, mencionado acima, considera algumas premissas, destacando-se:

- indústrias que apresentam suspeita de poluição, bem como aquelas que manuseiam substâncias perigosas durante o processo produtivo, em quantidades superiores a 300 ton/ano, são automaticamente classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que geram e armazenam resíduos classe I, bem como aquelas que armazenam seus resíduos, independente da quantidade, em local não seguro, são classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que geram e armazenam com segurança seus resíduos classe I são classificadas com potencial poluidor moderado;
- indústrias que dispõem ou tratam de forma segura seus resíduos classe I são classificadas com potencial poluidor reduzido;
- indústrias que geram resíduos classe II (>1.200 ton/ano) e não os armazenam de forma segura são classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas com área >1 ha) ou que infiltram seus efluentes são classificadas com potencial poluidor elevado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas com área entre 0,1 e 1 ha), são classificadas com potencial poluidor moderado;
- indústrias que tratam seus efluentes líquidos (lagoas com área <0,1 ha) são classificados com potencial poluidor reduzido;

- indústrias que possuem mais de 300 empregados e infiltram os efluentes domiciliares são classificadas com potencial poluidor moderado. Os casos que possuam menos de 300 empregados são classificadas com potencial poluidor reduzido.

Para as indústrias ligadas às atividades alcooleiras, as premissas adotadas são:

- usinas de açúcar e álcool, destilarias de álcool ou engenhos de aguardente que infiltram em área restrita até 100 m³/dia de restilo, são desprezadas ou classificadas com potencial poluidor reduzido;
- usinas e destilarias que infiltram concentradamente entre 100 e 1.000 m³/dia de vinhaça são classificadas com potencial de geração de carga poluidora moderado;
- indústrias de açúcar e álcool são classificadas com potencial de geração de carga poluidora elevado quando infiltram, concentradamente em uma pequena área, mais de 1.000 m³/dia.

Em trabalho realizado na Região Metropolitana de Campinas (SP), visando a classificação de áreas utilizadas para disposição de resíduos sólidos domiciliares Ferreira *et al.* (2000) utilizaram a metodologia baseada no Índice de Qualidade de Aterros de Resíduos (IQR), publicado no Inventário Estadual de Resíduos Sólidos Urbanos (Resolução SMA n.º 13 de 27/02/1998). Este índice consiste em avaliar a qualidade dos aterros sob 3 condições: inadequadas, controladas e adequadas. A qualidade é definida pela pontuação alcançada, variando de 0 a 10 pontos, considerando-se 41 variáveis dentro de 3 aspectos básicos: localização, infra-estrutura e condições operacionais.

Vale destacar ainda como metodologia para avaliar os riscos de contaminação ambiental, aquela adotada por Hassuda (1997) para gerenciar áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Trata-se de uma adaptação, para os padrões nacionais, da metodologia desenvolvida no Estado de Nordrhein-Westphalen na Alemanha. O método aperfeiçoado por Hassuda (1997) assume a existência de uma substância perigosa oriunda de lixo disposto ou solo contaminado. A área enfocada é avaliada considerando-se: a) a liberação de substâncias nocivas provenientes do local, b) a entrada dessas

substâncias nocivas nos recursos ambientais e d) o transporte (migração) e os efeitos das substâncias nocivas aos recursos ambientais.

O cálculo do risco real é obtido através de uma ponderação final, que aborda a importância do recurso ambiental. Esse método, utilizado nessa dissertação, é descrito no capítulo 3 (item 3.2).

3- METODOLOGIA

3.1- ESTUDO DA VULNERABILIDADE NATURAL DO AQÜÍFERO LIVRE

O mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre na presente dissertação, foi realizado através de duas metodologias distintas: o modelo GOD proposto por Foster & Hirata (1993), e o índice DRASTIC, desenvolvido por Aller *et al.* (1987) para os diversos ambientes hidrogeológicos conhecidos nos Estados Unidos.

No método GOD (Foster & Hirata 1993), cada letra representa um parâmetro a ser avaliado; sendo "G" (*Groundwater occurrence*) o tipo de ocorrência da água subterrânea; "O" (*Overall litology of aquiperm*) o litotipo da zona não saturada e "D" (*depth of water*) a profundidade do nível estático. Esses três parâmetros são multiplicados entre si, gerando o índice final de vulnerabilidade para o aquífero. A figura 7 ilustra os parâmetros citados e os índices de vulnerabilidade correspondentes. As modificações introduzidas estão relacionadas à profundidade do nível estático, cujos níveis foram melhor adaptados para a realidade local e as letras que compõem o nome do método destacados na figura original.

No modelo DRASTIC (Aller *et al.* 1987), cada letra que compõe o nome do método também representa os parâmetros a serem investigados, sendo estes:

D - Profundidade das águas subterrâneas (*Depth of groundwater*);

R - Recarga devido à chuva (*Recharge net*);

A - Meio aquífero (*Aquifer media*);

S - Solos (*Soil media*);

T - Topografia (*Topography*);

I - Impacto da zona vadoza (*Impact of the vadose zone*);

C - Condutividade hidráulica (*Hydraulic Conductivity of the aquifer*).

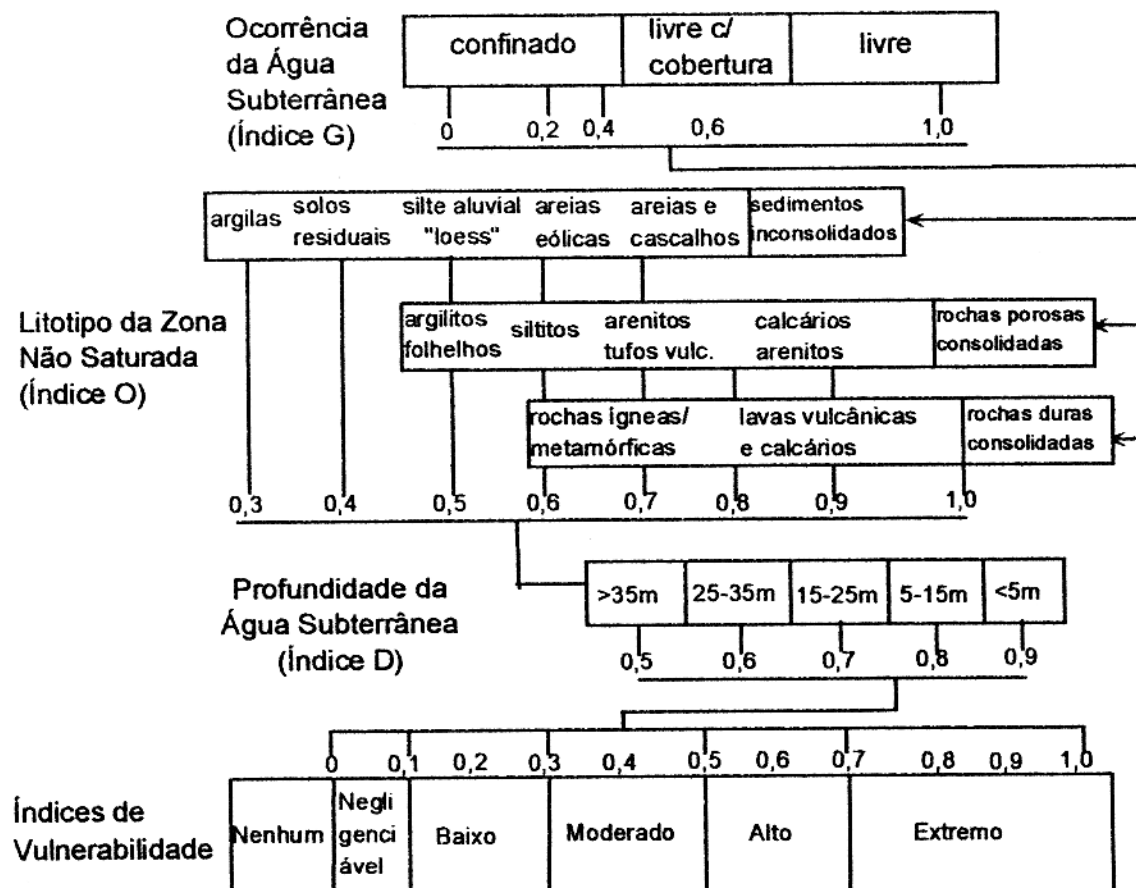


Figura 7- Parâmetros utilizados na avaliação da vulnerabilidade natural de um aquífero através do método GOD (Modificado de Foster & Hirata 1993).

Para cada fator DRASTIC foi determinado um peso relativo que varia entre 1 e 5 (Tabela 3), sendo o peso 5 inferido para o fator mais significativo e 1 para o menos importante. Esses pesos são uma constante e não podem ser mudados. Existe ainda um segundo peso atribuído ao uso de pesticidas agrícolas que não foi utilizado, por não enquadrar-se no presente trabalho.

Tabela 5- Pesos inferidos para os fatores DRASTIC.

FATOR DRASTIC	PESO
Profundidade da Água	5
Recarga	4
Meio Aquífero	3
Solo	2
Topografia	1
Impacto da Zona Vadosa	5
Condutividade Hidráulica	3

De acordo com a metodologia implantada por Aller *et al.* (1987), cada fator é avaliado em relação a outro, a fim de determinar o significado relativo de cada parâmetro com respeito ao potencial de contaminação. Com base em gráficos, a cada fator DRASTIC é inferida uma pontuação que varia entre 1 a 10 (Tabelas 6 a 12). Para os fatores D, R, S, T e C foram atribuídos valores específicos. Por sua vez, os fatores A e I, possuem seus valores atribuídos de acordo com os diversos ambientes hidrogeológicos identificados.

Esse sistema permite ao usuário determinar um valor numérico para cada ambiente hidrogeológico, utilizando um modelo aditivo. A equação para determinar o índice final DRASTIC é:

$$\text{Índice DRASTIC} = D_p D_c + R_p R_c + A_p A_c + S_p S_c + T_p T_c + I_p I_c + C_p C_c$$

onde: D_p , R_p , A_p , S_p , T_p , I_p , C_p correspondem aos pesos dos fatores DRASTIC que não podem ser modificados, enquanto que:

D_c , R_c , A_c , S_c , T_c , I_c , C_c correspondem aos fatores de carga das variáveis nos seus respectivos intervalos de ocorrência, cujo valor varia de acordo com o nível identificado pelo usuário do método.

Tabela 6- Profundidade do nível da água e respectivos valores.

Profundidade (m)	Valor Atribuído (Dc)
0 – 1.5	10
1.5 – 4.5	9
4.5 – 9.0	7
9.0 – 15.0	5
15.0 – 22.5	3
22.5 – 30.0	2
> 30.0	1
Peso: 5	

Tabela 7- Taxas de infiltração (recarga) e seus respectivos valores (Rc).

Taxa de infiltração (pol/ano)	Taxa de infiltração (mm/ano)	Valor Atribuído
2	< 51	1
2 – 4	51 – 102	3
4 – 7	102 – 178	6
7 – 10	178 – 254	8
> 10	> 254	9
	Peso: 4 (Rp)	

Tabela 8- Litotipos que compõem o aquífero e seus respectivos valores (Ac).

Litotipo	Valor Atribuído	Valor Médio Adotado
Folhelho maciço	1 – 3	2
Ígneas/metamórficas	2 – 5	3
Ígneas/metamórficas intemperizadas	3 – 5	4
Till glacial	4 – 6	5
Arenito acamadado, calcário e folhelho seqüencial	5 – 9	6
Arenito maciço	4 – 9	6
Calcário maciço	4 – 9	6
Areia e cascalho	4 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário cárstico	9 – 10	10
Peso: 3 (Ap)		

Tabela 9- Tipos de solo e seus respectivos valores (Sc).

Tipo de solo	Valor Atribuído
Fino ou ausente	10
Cascalho	10
Arenoso	9
Turfo	8
Argila agregada e/ou contraída	7
Marga arenosa	6
Marga	5
Silte margoso	4
Argila margosa	3
Lixo/esterco	2
Argila desagregada e não expansível	1
Peso: 2 (Sp)	

Tabela 10- Inclinação do relevo e seus respectivos valores (Tc).

Inclinação do relevo (%)	Valor Atribuído
0 – 1	10
1 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1
Peso: 1 (Tp)	

Tabela 11- litotipos que constituem a zona vadosa e seus respectivos valores (Ic).

Zona vadosa	Valor Atribuído	Valor Médio Atribuído
Camada confinante	1	1
Silte/argila	2 – 6	3
folhelho	2 – 5	3
Calcário	2 – 7	6
Arenito	4 – 8	6
Calcário acamadado, arenito, folhelho	4 – 8	6
Areia e cascalho com significativo silte e argila	4 – 8	6
Ígneas/metamórficas	2 – 8	4
Areia e cascalho	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Calcário cárstico	8 – 10	10
Peso: 5 (Ip)		

Tabela 12- Condutividade hidráulica e seus respectivos valores (Cc).

Condutividade Hidráulica (m/dia)	Valor Atribuído
0 – 4,1	1
4,1 – 12,2	2
12,2 – 28,5	4
28,5 – 40,7	6
40,7 – 81,5	8
> 81,5	10
Peso: 3 (Cp)	

Para avaliar-se a vulnerabilidade natural do aquífero através dessas duas metodologias, foram desenvolvidos diversos mapas através do *software Surfer for Windows Notes V6* desenvolvido por *Copyright Golden Software Incorporated*, sendo produzido um mapa para cada parâmetro utilizado em cada modelo. Por fim, foi obtido o mapa com o índice de vulnerabilidade final da área estudada, para os dois métodos aplicados.

Cabe ainda ressaltar que entre as duas metodologias aplicadas há parâmetros iguais, como o índice O do método GOD e o índice I do modelo DRASTIC, que

representam o material que compõe a zona não saturada, além do índice D, que está relacionado à profundidade do nível estático.

Dentre os diversos parâmetros utilizados para determinar a vulnerabilidade natural, através das duas metodologias aplicadas, as principais diferenças são:

- Para cada parâmetro no modelo DRASTIC é atribuído um peso, enquanto que, no método GOD, todos os índices apresentam a mesma relevância;
- No método GOD os fatores são multiplicados entre si, enquanto que no modelo DRASTIC é feita a soma destes;
- O modelo GOD não considera as características da zona saturada uma vez que os autores entenderam que nesse tipo de avaliação deve-se considerar a facilidade de uma carga contaminante atingir essa região do aquífero, já tendo passado pela zona não saturada. Por sua vez, o modelo DRASTIC considera que a vulnerabilidade implica na análise da zona saturada. Destaca-se que quando o contaminante atinge esta zona a contaminação do aquífero já é um fato consumado, de acordo com Foster (1987) os processos de atenuação tais como sorção e filtração mais intensos na zona do solo são pouco significativas;
- O modelo DRASTIC, acertadamente, considera a recarga e a topografia separadamente, uma vez que em uma área com topografia acidentada a como uma área de proteção ao sistema aquífero atenuando portanto uma possível contaminação recarga do aquífero se dará de forma bastante heterogênea; enquanto que em áreas relativamente planas, a recarga ocorrerá de uma maneira bem mais homogênea. Logo, o estudo da topografia se mostra bastante importante na diferenciação das zonas de recarga e descarga do aquífero;
- O modelo GOD considera a recarga associada à carga contaminante, no entanto, mapas de vulnerabilidade são utilizados com o fim de preservar uma área de uma possível atividade contaminante através do conhecimento de seu ambiente de subsuperfície.

3.1.1- Parâmetros investigados

No presente estudo, foram considerados a profundidade do nível estático (D), a recarga (R), o meio aquífero (A), a topografia (T), o índice da zona vadosa (I) e a

condutividade hidráulica (C), os quais têm o maior peso na definição do índice DRASTIC.

Não foi considerado somente o tipo de solo (parâmetro S), uma vez que, este foi interpretado como parte da zona não saturada. Vale ressaltar que, dentre todos os parâmetros utilizados no modelo DRASTIC, o tipo de solo é um dos fatores que apresenta menor peso (Tabela 5).

3.1.1.1- Profundidade do nível estático (Índice D dos modelos GOD e DRASTIC)

A importância da profundidade do nível estático, deve-se ao fato da mesma representar a distância que um contaminante deve atravessar antes de atingir o aquífero. Geralmente, há uma chance maior de ocorrer atenuação da contaminação com o aumento da profundidade da água, em decorrência do maior tempo de percurso dos contaminantes, propiciando a atuação de diversos processos naturais de atenuação.

Em estudos de aquíferos livres, o nível d'água representa a elevação superior do lençol freático. No caso de aquíferos que encontram-se confinados, a profundidade da água deve ser redefinida como o topo do aquífero (Aller *et al.* 1987).

3.1.1.2- Recarga (Índice R do método DRASTIC)

A recarga é definida como a quantidade total de água que atinge a área considerada e infiltra-se no solo até atingir o aquífero, representando a porcentagem de água por unidade de área do terreno que penetra na superfície do solo e atinge o nível freático. A água da recarga é capaz de transportar uma carga contaminante verticalmente, até atingir o aquífero, e horizontalmente, dentro deste.

Quanto maior a recarga de uma região, maior será o potencial de contaminação da água subterrânea, até que o volume de água da recarga seja grande o suficiente para causar diluição do contaminante, diminuindo gradualmente o potencial de contaminação.

Esse parâmetro foi expresso originalmente no método DRASTIC em polegadas/ano. Porém, devido essa unidade ser pouco utilizada no Brasil, adotou-se a

unidade mm/ano no presente trabalho. Os valores nas duas escalas podem ser observados na tabela 7.

A principal fonte de recarga das águas subterrâneas geralmente é a precipitação pluviométrica, que infiltra-se pela superfície do terreno e percola até o nível d'água.

Os valores da recarga podem ser utilizados para avaliar tanto aquíferos livres como confinados. No entanto, em áreas com aquíferos livres, a recarga geralmente se dá mais rapidamente e o potencial de contaminação é geralmente maior do que em aquíferos confinados. Em condições não confinantes, os valores da recarga geralmente refletem os valores do balanço hídrico da região.

Além dos valores de infiltração da precipitação pluviométrica, são consideradas fontes de recarga a irrigação e a recarga artificial. Essas fontes devem afetar significativamente o montante de água capaz de carrear um poluente até o aquífero. No entanto, nessa dissertação foi considerada somente a recarga a partir da precipitação pluviométrica, já que na área de estudo não foi identificado nenhum outro tipo de recarga. Para a obtenção da recarga foi realizado um balanço hídrico com os dados de precipitação e evaporação a fim de obter-se os valores de infiltração da água no solo.

3.1.1.3- Meio aquífero (Índice A do modelo DRASTIC)

Esse parâmetro refere-se aos sedimentos e rochas consolidados ou inconsolidados que constituem o aquífero.

O caminho que uma carga contaminante seguirá, será fortemente influenciado pelo fraturamento ou por aberturas interconectadas, geradas por dissoluções, as quais facilitam o fluxo. Em geral, quanto maior o tamanho dos grãos e quanto mais aberturas ou fraturas dentro do aquífero, maior será a permeabilidade e menor a capacidade de atenuação do meio aquífero.

Neste trabalho, o aquífero avaliado foi caracterizado a partir de perfis compostos através de perfurações a trado manual, além de perfis de sondagens geotécnicas.

3.1.1.4- Topografia (Índice T do modelo DRASTIC)

A avaliação da topografia de uma área na aplicação do método Drastic é importante devido ao fato de que, quanto mais plana for a área em estudo, maior será o

tempo de contato de uma provável carga contaminante com o solo subjacente, podendo esta infiltrar-se através da zona vadosa e atingir o lençol freático, contaminando assim o aquífero. Por outro lado, em regiões com a topografia acidentada, o tempo de permanência de uma carga contaminante no solo será bem menor, pois, devido ao gradiente topográfico, o escoamento superficial será mais intenso que nas regiões mais planas.

Na área estudada, a topografia encontra-se aparentemente plana, uma vez que, através do mapa topográfico da área, observou-se que uma variação das cotas locais entre 18,0 m e 16,0 m especificamente onde são depositados os resíduos sólidos, enquanto que em suas proximidades, onde foram realizadas algumas sondagens geotécnicas, estas variam entre 8,2 m a 14,5 m. Considerando-se as cotas topográficas e a distância entre os pontos investigados, foram obtidos gradientes topográficos variando entre 0% e 1,5%.

3.1.1.5- Impacto da zona vadosa (Índices I e O dos modelos DRASTIC e GOD, respectivamente).

A zona vadosa, ou não saturada é definida como a região logo acima do nível estático, que encontra-se insaturada ou descontinuamente saturada. O tipo de material que compõe a zona vadosa determina as características de atenuação dos constituintes abaixo do horizonte de solo típico e acima do nível estático. Processos como biodegradação, neutralização, filtração mecânica, reação química, volatilização e dispersão; ocorrem sobretudo na zona não saturada, sendo que a biodegradação e a volatilização devem diminuir de intensidade com o aumento da profundidade. O meio também controla a distância e o percurso a ser seguido pelo fluxo subterrâneo, afetando, dessa forma, o tempo disponível de atenuação e a quantidade de material encontrado. O percurso também é fortemente influenciada pela presença de fraturamentos.

As características litológicas da zona não saturada foram definidas principalmente através das perfurações a trado manual, tendo o material coletado sido classificado através de análise granulométrica.

3.1.1.6- Condutividade hidráulica (Índice C do método DRASTIC)

A condutividade hidráulica do aquífero refere-se à habilidade do material que compõe o aquífero em transmitir água, determinando também a taxa com que a água subterrânea fluirá sob um determinado gradiente hidráulico. A condutividade hidráulica também controla o percurso dos contaminantes desde sua fonte até o aquífero. Portanto, é importante conhecer a condutividade hidráulica tanto na zona não saturada como na zona saturada, uma vez que a primeira pode funcionar como uma atenuadora dos processos de contaminação das águas subterrâneas. A condutividade hidráulica da zona saturada foi determinada através de um ensaio de bombeamento de curta duração (item 3.4.1) enquanto que para a zona vadosa foi obtida através de ensaios de infiltração (item 3.3).

3.2- RISCO DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

Embora o presente estudo enfoque, especificamente, o risco de contaminação das águas subterrâneas da área considerada, adotou-se nessa avaliação uma metodologia bem mais abrangente. Trata-se do modelo adotado por Hassuda (1997) na avaliação de riscos ambientais relacionados a lixões e atividades industriais, no Estado de São Paulo; a qual considera não apenas as águas subterrâneas mas também outros recursos naturais e a saúde pública. Esse método foi adotado nessa dissertação por entender-se que, os riscos de contaminação das águas subterrâneas não podem ser abordados sem considerar-se outros elementos que compõem o meio físico de uma área, particularmente o solo, a vegetação e as águas superficiais. Essa abordagem conjunta é fundamental, uma vez que a contaminação de um desses recursos pode afetar os demais. É também imprescindível considerar-se os riscos que a atividade potencialmente poluidora oferece para a saúde humana.

A avaliação do risco de contaminação compreende a identificação das características naturais do meio ambiente somadas às diversas atividades antrópicas desenvolvidas em uma certa região. Logo, a associação nesta dissertação, de duas metodologias de mapeamento da vulnerabilidade das águas subterrâneas somadas à análise do risco apresentado pela atividade industrial local permite realizar uma análise quantitativa/qualitativa tanto da proteção natural do aquífero livre como dos riscos de

contaminação ambiental, buscando proteger desta forma o meio ambiente e a saúde da população local.

De acordo com a metodologia adotada por Hassuda (1997), ao assumir-se a existência de uma substância perigosa, denominada r_0 , proveniente da disposição de lixo ou solo contaminado, a área pode ser avaliada em três etapas distintas: a liberação de substâncias nocivas provenientes do local (I), a entrada nos recursos ambientais dessas substâncias nocivas (II) e o transporte (migração) e os efeitos das substâncias nocivas aos recursos ambientais (III). A quantificação dos riscos reais existentes no local leva à pontuação dos riscos r_I , r_{II} e r_{III} . Os fatores de atenuação ou de aumento de risco são denominados multiplicadores m (m_I , m_{II} e m_{III}). Finalmente, a avaliação do risco se dá através das fórmulas:

$$r_I = m_I \times r_0$$

$$r_{II} = m_{II} \times r_I$$

$$r_{III} = m_{III} \times r_{II}$$

O cálculo do risco real é obtido através de uma ponderação final (m_{IV}), que aborda a importância do recurso ambiental, atingindo a pontuação final $r_{IV} = m_{IV} \times r_{III}$.

A área de disposição de resíduos, pode conter substâncias danosas ao meio ambiente e à saúde pública, ao passo que essas substâncias podem apresentar seus efeitos nocivos somente quando entrarem em contato com o recurso natural. Portanto, na avaliação do risco para os recursos ambientais e a saúde pública, são consideradas três fases, que são:

- 1) Determinação da origem e do volume do grupo de substâncias presentes nos resíduos, caracterizada pela massa de lixo quanto à sua origem, o volume e o tipo de substâncias. Estas últimas, são classificadas de acordo com sua periculosidade, tamanho da área de disposição e toxicidade;
- 2) Determinação da forma de propagação das substâncias nocivas, onde são avaliados os prováveis caminhos a serem seguidos pela substância originária dos resíduos, que pode difundir-se através do ar, solo, água superficial e água subterrânea;
- 3) Determinação dos bens a proteger (saúde e vida da população, águas superficiais, águas subterrâneas, matas naturais e outros bens a proteger) existentes

na área de disposição e em suas adjacências, analisando-se os efeitos que as substâncias causam aos recursos naturais e à saúde pública.

A periculosidade de uma substância, resultante de uma atividade, pode ser avaliada através da periculosidade do local de disposição, de sua forma de propagação e dos efeitos sobre os bens a proteger.

Cada componente de risco é composta por um parâmetro representante de uma ação ou fato (Rn), que é multiplicado por um fator de minimização ou de agravamento do risco (Mn). Esses dois parâmetros são classificados em três categorias, alto (3), médio (2) e baixo (1). A avaliação do risco é calculada de acordo com a fórmula abaixo.

$$R = (MI.RI) \times (MII.RII) \times (MIII.RIII) = Ra \times Rb \times Rc$$

De acordo com a tabela 12, o fator Ra é composto pelas componentes Ra1, que corresponde ao tipo e ao volume de resíduos do local de disposição, e Ra2, que se refere às substâncias que podem ser encontradas no local. Os valores de Rn e Mn para esses dois parâmetros encontram-se nas Tabelas 13 e 14.

Tabela 13- Sistema de pontuação adotado por Hassuda (1997).

Disposição de Resíduos (Periculosidade) (Fator Ra)	Ra = Ra1+Ra2	(Ra1)	Tipo de Resíduo	(Ra2)	Grupo de Substâncias
Propagação (Fator Rb)	Rb = Rb1+ Rb2+Rb3 +Rb4	(Rb1) Ar	(Rb2) Água Subterrânea	(Rb3) Água Superficial	(Rb4) Solo
Efeitos sobre os bens a proteger (Fator Rc)	Rc=Rc1+ Rc2	(Rc1)	Dentro da Área	(Rc2)	Fora da Área

Nos locais de disposição em que resíduos de vários tipos estão misturados; deve-se adotar a pontuação da pior situação ou de maior risco.

Tabela 14- Valores de Mn e Rn para o componente Ra1 (Tipo e volume de resíduos do local de disposição).

DISPOSIÇÃO: Tipos de Resíduos	Mn	Rn
Industrial	1,90	3
Serviço de Saúde	1,90	3
Domiciliar	1,90	2
Mineração	1,90	1
Inerte	1,90	1
Varrição	1,90	1
Entulhos	1,90	1
Lodo do Tratamento de Águas Residuais	1,90	2
Outros Lodos	1,90	3
Lodo de Dragagem	1,90	3
VOLUME DE DISPOSIÇÃO DE RESÍDUOS		
>1.000.000 m ³	0,48	3
100.000 – 1.000.000 m ³	0,48	2
<100.000 m ³	0,48	1

Tabela 15- Valores de Mn e Rn para o componente Ra2 (Grupo de substâncias que podem ser encontradas).

GRUPOS DE SUBSTÂNCIAS	Mn	Rn (confirmado)	Rn (Estimado)
Orgânicos halogenados voláteis	0,95	3	2
Orgânicos não halogenados voláteis	0,95	3	2
HC clorados voláteis	0,95	3	2
Aromáticos clorados voláteis	0,95	3	2
Aromáticos clorados (PCB)	0,95	3	2
Dioxinas e furanos	0,95	3	2
Compostos orgânicos nitrogenados, fosfatados, sulfados (sem pesticidas)	0,95	3	2
Hidrocarbonetos aromáticos (sem HPA)	0,95	3	2
Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPA)	0,95	3	2
Fenóis	0,95	3	2
Derivados de petróleo	0,95	2	1
Alcatrões e produtos similares	0,95	2	1
Pesticidas	0,95	3	2
Metais e seus compostos	0,95	3	2
Compostos inorgânicos (sem metais)	0,95	2	1
Compostos inorgânicos (mais tóxicos, cianetados, fluorados e cromados)	0,95	3	2
Outras substâncias	0,95	2	1
Desconhecida	0,95	1	1

O fator Rb é constituído pelos componentes Rb1 (possibilidade de propagação no ar), Rb2 (possibilidade de propagação na água subterrânea), Rb3 (possibilidade de propagação na água superficial) e Rb4 (possibilidade de propagação no solo). Os valores de Rn e Mn para os parâmetros acima citados encontram-se nas tabelas 15, 16, 17 e 18.

A propagação de substâncias nocivas através do ar (Rb1), pode se dar através de:

- ar livre diretamente sobre o local contaminado;
- ar livre nos arredores do local contaminado;
- ar nos poros do solo;
- ar existente nos ambientes fechados no solo ou sobre o solo (porões, clarabóias, etc.).

Tabela 16- Valores de Mn e Rn para a componente Rb1 (ar).

QUALIDADE DO AR DO SOLO	Mn	Rn
Análise não realizada	0,3	2
Contaminada	0,3	3
Não contaminada	0,3	0
Desconhecida	0,3	2
Eventos importantes		
Explosão, incêndios, danos à saúde	0,4	3
Emanação perceptível de gases/vapores, dispersão de poeira contaminada	0,4	2
Danos materiais, outros	0,4	2
Danos à vegetação	0,4	2
Inexistente	0,4	0
Presença de vapores/gases nas edificações vizinhas		
Não	0,4	0
Sim	0,4	3
Desconhecido	0,4	1
Distância até a edificação mais próxima		
<50 m	0,4	3
50 – 100 m	0,4	2
>100 m	0,4	1
Edificações inexistentes	0,4	0

As águas subterrâneas atuam como um dos principais meios de entrada e transporte de substâncias contaminantes aos recursos ambientais, sendo que, os fatores mais significativos na liberação de substâncias nocivas são:

- impermeabilização superficial e cobertura intermediária (tipo, qualidade, cobertura vegetal);
- escoamento das águas superficiais (configurações de superfícies, declividade, drenagem da água, tipo e condições de canais);
- adições de água (de encostas, fontes);
- clima (quantidade de chuvas, taxa de evaporação);
- impermeabilização do fundo (material, declividade);
- drenagem do fundo ou de camadas intermediárias compactadas (perfil do fundo, distâncias, pressões hidrostáticas, diâmetro e inclinação de canalizações de drenagem);
- existência e durabilidade de impermeabilizações.

Tabela 17- Valores de Rn e Mn para a Componente Rb2 (Águas Subterrâneas).

CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS	Mn	Rn
Sim, contaminada	0,5	3
Não	0,5	0
Desconhecida	0,5	2
Uso da água subterrânea afetada pela contaminação		
Abastecimento público	0,4	3
Abastecimento domiciliar	0,4	3
Recreação	0,4	3
Irrigação, pecuária	0,4	2
Uso industrial	0,4	1
Desconhecida	0,4	2
Inexistente	0,4	0
Textura predominante do solo		
Arenosa, siltosa	0,1	3
Argilosa	0,1	0
Desconhecida	0,1	2
Impermeabilização inferior		
Inexistente, outros, desconhecida	0,2	3
Argila ou membrana	0,2	1
Argila e membrana, dupla membrana	0,2	0
Destino final dos líquidos percolados, efluentes, substâncias		

e materiais		
Água superficial, infiltração no solo ou em poços	0,2	3
Estação de tratamento	0,2	0
Nível sazonalmente mais elevado da água subterrânea		
Em contato com resíduo/solo contaminado	0,1	3
Abaixo dos resíduos /solo contaminado	0,1	0
Desconhecida	0,1	2
Contexto Hidrogeológico		
Quaternário, Terciário em área de recarga, cárstico, cristalino aflorante, cristalino com manto arenoso em área de descarga	0,4	3
Terciário em área de descarga, cristalino com manto argiloso em área de recarga, cristalino com manto arenoso em área de descarga	0,4	2
Cristalino com manto argiloso em área de descarga	0,4	1
Desconhecido	0,4	3

As águas superficiais assim como as subterrâneas, são muito importantes no processo de liberação, entrada e transporte de substâncias nocivas, sendo os fatores mais importantes:

- impermeabilização intermediária e superficial;
- condições topográficas;
- adições de água;
- clima;
- drenagem de fundo ou de camadas intermediárias compactadas;
- tipo de enchimento;
- quantidade de substâncias nocivas.

Tabela 18- Valores de Mn e Rn para a componente Rb3 (Águas superficiais).

QUALIDADE DA ÁGUA SUPERFICIAL	Mn	Rn
Não utilizada	0,6	0
Sim, utilizada para abastecimento público	0,6	3
Sim, utilizada para abastecimento domiciliar	0,6	3
Sim, não utilizada	0,6	1
Sim, utilizada para irrigação, pecuária, psicultura	0,6	2
Sim, utilizada para recreação	0,6	3
Desconhecida	0,6	2
Possibilidade de influência direta da área sobre águas superficiais		
Não	0,4	0
Sim, utilizada para abastecimento público	0,4	3

Sim, utilizada para abastecimento domiciliar	0,4	3
Sim, não utilizada	0,4	1
Sim, utilizada para irrigação, pecuária, psicultura	0,4	2
Sim, utilizada para recreação	0,4	3
Desconhecida	0,4	2

Possibilidade de enchente na área e uso da água superficial

Não	0,3	0
Sim, utilizada para abastecimento público	0,3	3
Sim, utilizada para abastecimento domiciliar	0,3	3
Sim, não utilizada	0,3	1
Sim, utilizada para irrigação, pecuária, psicultura	0,3	2
Sim, utilizada para recreação	0,3	3
Desconhecida	0,3	2

O solo possui as seguintes relações com a área de disposição de resíduos:

- O solo contaminado é um recurso ambiental (caso 1);
- O solo a proteger está abaixo do local contaminado e é prejudicado principalmente pelo lixiviado (caso 2);
- O solo a ser protegido é o material de cobertura do local contaminado e pode estar prejudicado principalmente por substâncias nocivas formadoras de gás (caso 3);
- O solo a ser protegido encontra-se na vizinhança do local contaminado (caso 4).

No primeiro exemplo, caso o alvo de investigação seja o próprio solo, a avaliação da liberação assim como a entrada de substâncias nocivas ao recurso ambiental deixa de ser necessária, visto que a contaminação já está caracterizada. Se o foco de risco de contaminação limita-se diretamente com o recurso ambiental, não há área de migração. Logo, a avaliação deve partir das condições mais desfavoráveis (casos 2 e 3). No último caso, deve-se considerar as condições de transporte das substâncias nocivas do local contaminado ao recurso ambiental solo.

Tabela 19- Valores de Mn e Rn para a componente Rb4 (solo).

QUALIDADE DO AR DO SOLO	Mn	Rn
Análise (0 a 1m de profundidade)		
Contaminado	0,5	3
Não contaminado	0,5	0
Análise não realizada	0,5	2
Desconhecido	0,5	2

Análise (> 1 m de profundidade)		
Contaminado	0,5	3
Não contaminado	0,5	0
Análise não realizada	0,5	2
Desconhecido	0,5	2
Eventos Importantes		
Recalque, desabamento, erosão	0,4	2
Danos à vegetação	0,4	2
Dispersão de poeira	0,4	1
Danos a animais	0,4	2
Danos ao homem	0,4	3
Danos materiais	0,4	2
Outros, desconhecida	0,4	1
Inexistente	0,4	0
Riscos Comprovados		
Não, assegurado por análise	0,6	0
Sim, para a saúde da população	0,6	3
Sim, para animais	0,6	2
Sim, para a vegetação	0,6	2
Desconhecida	0,6	2
Impermeabilização Superficial		
Membrana ou solo	0,6	0
Pavimentação (asfalto ou cimento)	0,6	1
Aterro argiloso	0,6	2
Aterro arenoso	0,6	3
Inexistente, desconhecido	0,6	3
Danos visíveis (Superfície do solo)		
Odor, devido à contaminação	0,4	3
Coloração	0,4	3
Inexistente	0,4	0

O fator Rc corresponde aos possíveis efeitos de substâncias nocivas sobre os bens a proteger, sendo composto pelas componentes Rc1 (bens a proteger na área de disposição dos resíduos) e Rc2 (bens a proteger nas adjacências da área de disposição dos resíduos a um raio de 1000 metros de distância); cujos respectivos valores de Rn e Mn encontram-se na tabela 19. A ocupação pelo homem e outros componentes ambientais que se encontram nos locais de disposição de resíduos, assim como em suas adjacências, podem ser direta ou indiretamente atingidos pelas substâncias

tóxicas provenientes dos resíduos. De acordo com Hassuda (1997), entende-se por contato direto quando o ser humano ingere água contendo substâncias tóxicas e/ou através de uma simples alergia de pele; enquanto que como exemplo de contato indireto, o autor cita uma substância tóxica que entra na cadeia alimentar e atinge o ser humano. Os bens a proteger adotados pelo autor incluem os recursos naturais como rios, lagos, áreas de proteção ambiental, florestas nativas; além de áreas urbanas como zona ferroviária, rodoviária, aeroportos, bairros residenciais; ou seja, a saúde ambiental em geral.

Tabela 20- valores de Mn e Rn para a componente Rc (Bens a proteger).

ÁREAS COM BENS A PROTEGER/OCUPAÇÃO DO SOLO	Mn (dentro)	Mn (fora)	Rn
Zona ferroviária	2,22	1,11	1
Zona viária	2,22	1,11	1
Estacionamento	2,22	1,11	1
Aeroporto	2,22	1,11	1
Área militar	2,22	1,11	1
Comercial	2,22	1,11	1
Industrial	2,22	1,11	1
Área de interesse público	2,22	1,11	1
Mineração	2,22	1,11	1
Residencial com hortas (alta densidade populacional)	2,22	1,11	3
Residencial com hortas (baixa densidade populacional)	2,22	1,11	3
Residencial sem hortas (alta densidade populacional)	2,22	1,11	3
Residencial sem hortas (baixa densidade populacional)	2,22	1,11	3
Parque, área verde	2,22	1,11	2
Parque infantil/escola infantil	2,22	1,11	3
Área de lazer e desportos	2,22	1,11	2
Cemitérios	2,22	1,11	1
Escola	2,22	1,11	2
Hortas	2,22	1,11	3
Área de pecuária	2,22	1,11	1
Área agrícola	2,22	1,11	3
Mata natural	2,22	1,11	1
Área de proteção ambiental	2,22	1,11	2
Área de proteção de mananciais	2,22	1,11	2
Bacia hidrográfica para abastecimento	2,22	1,11	3

Aquíferos importantes	2,22	1,11	2
Zona de maior restrição de proteção de mananciais	2,22	1,11	3
Área inundável, várzea	2,22	1,11	2
Represa para abastecimento público	2,22	1,11	3
Água superficial para abastecimento público	2,22	1,11	3
Poço para abastecimento público	2,22	1,11	3
Poço para abastecimento domiciliar	2,22	1,11	3

Finalmente, obtêm-se a pontuação dos fatores Ra, Rb e Rc para o risco de contaminação ambiental através do produto final $R = (Ra1+Ra2) \times (Rb1+Rb2+Rb3+Rb4) \times (Rc1+Rc2)$, que é igual a: $R = Ra \times Rb \times Rc$, como apresentado na tabela 20.

Tabela 21- Totalização do sistema de pontuação para o risco de contaminação.

Resíduo		
Origem, composição e volume	$Ra = mI \times rI = 10$	x
Propagação		
Ar, água e solo	$Rb = mII \times rII = 10$	x
Bens a proteger	$Rc = mIII \times rIII = 10$	
Pontuação final	$R = Ra \times Rb \times Rc = 1000$	

3.3- ESTUDO DA ZONA NÃO SATURADA

A zona não saturada ou vadosa corresponde à região entre a superfície do terreno até o topo do nível estático e apresenta variações sazonais de acordo com a maior ou menor incidência de chuvas.

Torna-se necessário, portanto, um estudo detalhado da zona vadosa, por ser esta a primeira barreira natural entre uma carga contaminante pontual e o aquífero propriamente dito. Isto porque caso o material que compreende a zona vadosa apresente altas porosidade e permeabilidade, o acesso da carga contaminante ao aquífero será bastante facilitado, como no caso de sedimentos arenosos, basaltos fraturados ou calcários cársticos. Por outro lado, quando esta zona apresenta-se bastante consolidada, com baixos valores de porosidade e permeabilidade, como no caso de lentes de argila, argilitos ou folhelos maciços, o acesso da carga contaminante será dificultado, podendo mesmo impedir sua chegada à zona saturada.

Para a obtenção da condutividade hidráulica na zona não saturada foi utilizado o teste de infiltração proposto pela ABGE (1996). Os resultados obtidos através deste

método foram comparados com os valores da condutividade hidráulica de sedimentos com as mesmas características granulométricas.

3.3.1- Análises granulométricas

Para as análises granulométricas os sedimentos foram coletados em perfurações a trado manual com 150 mm (6") de diâmetro. Inicialmente, foram coletadas amostras a cada metro de profundidade, ou quando havia mudança de material, sendo em seguida selecionado cerca de 1kg de amostra através de quarteamento. Já em laboratório, as amostras foram secas em estufa e novamente quarteadas, a fim de se obter uma quantidade menor para o peneiramento, sem no entanto deixar de se utilizar uma amostra representativa.

Para determinar a granulometria do material, foram utilizados os métodos de peneiramento e decantação por centrifugação.

Inicialmente, as amostras foram secas para serem pesadas. Depois o material grosso foi separado do mais fino por lavagem, para a execução das análises granulométricas.

Para o peneiramento, foram utilizadas 12 peneiras de 8 polegadas de diâmetro de armação com 1 a 2 polegadas de altura, possuindo telas com malhas padronizadas entre as frações $> 2,00$ mm a $< 0,062$ mm. Nesse conjunto, as peneiras são dispostas umas sobre as outras com o diâmetro da malha decrescendo de cima para baixo.

Para a separação das frações inferiores a 0,062 mm foi utilizada a sedimentação por centrifugação por ser um processo mais rápido e com menor risco de grandes imprecisões. A força aplicada às partículas foi 1000 vezes maior do que a da gravidade, num intervalo de tempo de 2 minutos, para a obtenção da granulometria silte.

A fração argila foi determinada por cálculo, após a obtenção das frações areia e silte, obtendo-se assim a composição granulométrica de cada intervalo dos perfis analisados.

Os principais parâmetros determinados através da análise granulométrica foram a granulometria média e textural de Folk (1976) e o grau de seleção. Esses parâmetros foram obtidos através do *software* Grans, desenvolvido pelo Departamento de Geologia e Geofísica Marinha da Universidade Federal Fluminense.

3.3.2- Teste de infiltração

O teste de infiltração utilizado para determinar a condutividade hidráulica na zona não saturada foi o ensaio de rebaixamento, de acordo com a metodologia recomendada pela ABGE (1996). No entanto, foram realizadas algumas modificações, de acordo com a conveniência de aplicação do teste, conforme descrito posteriormente nos resultados obtidos. Esse ensaio consistiu em perfurar-se o solo com um trado manual, com broca de 140,50mm (5,51") de diâmetro, até a profundidade de 2,00 metros. A partir de então, inseriu-se um tubo de 0,5 metros de altura dentro do furo. Este último foi então preenchido com água até a borda durante 10 minutos, até a saturação. Em seguida, interrompeu-se o fornecimento de água, tomando-se este como o instante zero. A intervalos curtos no início, e mais longos em seguida, acompanhou-se o rebaixamento do nível d'água. O método recomenda que o ensaio seja concluído quando o rebaixamento atingir 20% da carga inicial aplicada ou 30 minutos de ensaio. Por margem de segurança, os ensaios foram realizados durante 40 minutos. A figura 11 ilustra como o método foi executado.

A condutividade hidráulica foi obtida então através da fórmula:

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times \frac{d_1^2}{8h_o \sqrt{d_o L}}$$

Onde:

Δt = tempo de duração do ensaio;

Δh = Variação do nível d'água durante o ensaio;

d = diâmetro da perfuração;

L = comprimento do intervalo testado ($1 \geq L \leq 3$ m)

h_o = distância do início do ensaio até a metade de L

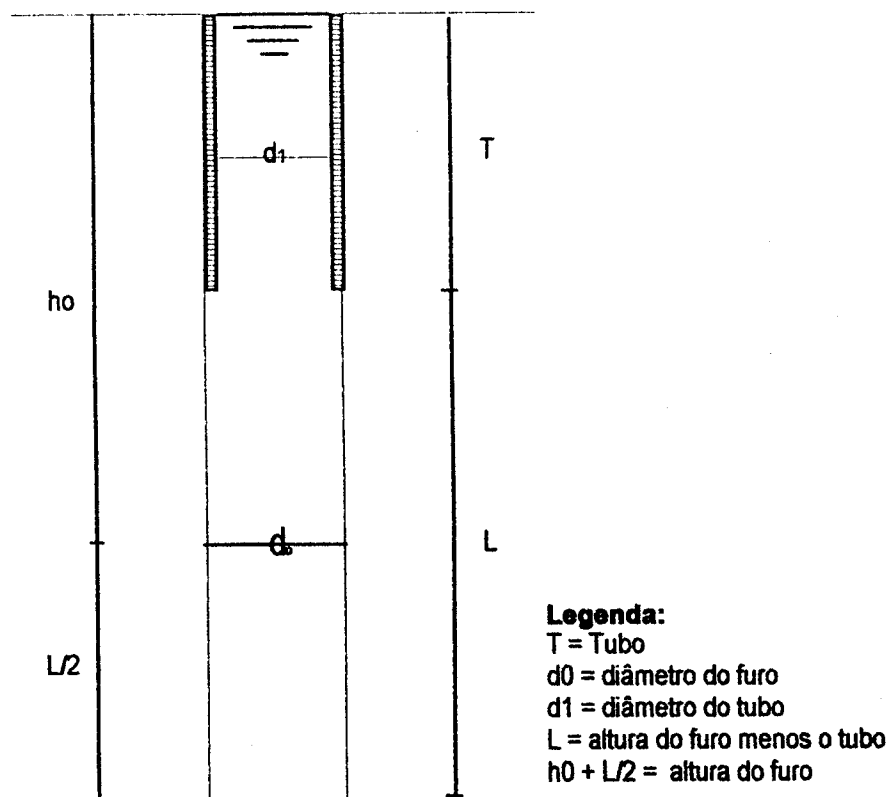


Figura 11- Ensaio de rebaixamento para cálculo da condutividade hidráulica na zona não saturada (ABGE 1996).

3.4- ESTUDO DO AQÜÍFERO LIVRE

3.4.1- Determinação da velocidade do fluxo e elaboração do mapa potenciométrico

Para determinar a velocidade do fluxo foi realizado um teste de bombeamento, que não pôde ser executado dentro da área de estudo pela falta de energia elétrica no local, não sendo possível portanto a instalação de uma bomba elétrica. Foi então realizado um teste nas proximidades da área, em um poço tubular com cerca de 28 metros de profundidade (informação verbal do proprietário), localizado em um terreno particular a cerca de 500 m da área. No teste utilizou-se uma bomba da marca WEG, modelo 5GJO294 de 3430 RPM. O teste foi realizado durante 70 minutos devido à precariedade da bomba.

Os dados do teste foram interpretados através do software *Aquifer Test* da empresa *Waterloo Hydrogeology*, através do método Cooper & Jacob (*apud* Driscoll

1987). A partir do valor de transmissividade (T) obtido através do gráfico rebaixamento *versus* tempo foi determinado o valor da condutividade hidráulica (K) do aquífero, através da expressão $K = T/b$, sendo b a sua espessura. Esta última foi obtida das perfurações a trado e das sondagens geotécnicas.

Conhecido o valor de K, a velocidade do fluxo (v) foi determinada através da lei de Darcy, sendo $v = K/\eta_{ef} \times dh/dl$.

Onde: η_{ef} = porosidade efetiva para fluxo

dh/dl = gradiente hidráulico

Nessa equação, considerou-se a porosidade efetiva para fluxo (η_{ef}) como sendo igual a porosidade total. O gradiente hidráulico foi determinado através da diferença da carga hidráulica (dh) entre os poços 7 e 9 e da distância (dl) entre estes.

Para elaborar o mapa potenciométrico da área estudada foram utilizados os valores da carga hidráulica obtidos a partir das cotas topográficas e da profundidade da água referentes às sondagens geotécnicas, aos furos de trado e aos poços de monitoramento apresentados na figura 12. A partir do mapa isopotenciométrico foram traçadas as linhas de fluxo, considerando o sentido do fluxo das áreas de maior para as de menor potencial.

3.4.2- Estimativa da recarga através do balanço hídrico

Na determinação da vulnerabilidade de um aquífero, a taxa de recarga deste é um dos parâmetros mais difíceis de serem obtidos. Esse deve ser um dos motivos pelo qual a maioria das metodologias voltadas para a determinação da vulnerabilidade de aquíferos não utilizam esse parâmetro, a exemplo dos modelos desenvolvidos por Taltasse (1972) e Duarte (1980). Além do mais, diversos métodos desenvolvidos até hoje, para estimar a taxa de recarga de um aquífero, ou seja, o volume de água da precipitação que atinge o nível estático, apresentam inúmeras limitações, já que em alguns desses, parâmetros de difícil obtenção são considerados, como irradiação solar e evapotranspiração.

Uma vez que no presente trabalho utilizou-se o modelo DRASTIC (Aller *et al.* 1987) para determinar a vulnerabilidade natural do aquífero livre, que inclui entre seus parâmetros de avaliação a recarga, obtida através da taxa de infiltração no solo, tornou-

se necessário a realização do balanço hídrico da região. Nesse balanço foram utilizados os dados de temperatura, evapotranspiração potencial e precipitação do município de Belém, referentes aos anos de 1961 a 1990 (INMET 1992), devido à proximidade e à homogeneidade no clima das duas regiões.

Dentre os diversos métodos desenvolvidos para o estudo do balanço hídrico de aquíferos livres, foi utilizado nessa dissertação o modelo de Thornthwaite & Mather (*apud* Vasconcelos 1994), que apesar de todas suas limitações, apresentou-se como o mais preciso para a nossa região (Vasconcelos 1994).

A equação geral do balanço hídrico médio é :

$$P = S + E + I_T$$

Sendo: P a lâmina d'água precipitada sobre o solo, S o escoamento superficial, E a evapotranspiração e I_T a infiltração total.

A infiltração total (I_T) inclui a água retida no solo (I_r) e a água que penetra no subsolo (I_w) conhecida por infiltração eficaz, correspondendo à parcela da precipitação que alimenta a reserva de águas subterrâneas, diretamente ligada às flutuações da superfície potenciométrica que reflete a variação dessas reservas (Vasconcelos 1994).

No caso de aquíferos livres, o volume de água armazenado não é constante, estando relacionado às variações observadas na superfície potenciométrica (dW), sendo que o principal aporte de um aquífero livre é a infiltração eficaz (I_w). Logo, a expressão utilizada no balanço hídrico de aquíferos livre é:

$$P = S + E + I_w \pm dW$$

Como no balanço hídrico de aquíferos, em geral, o escoamento superficial (S) é insignificante, devido a própria morfologia do solo, o que ocorre realmente é que, uma parte infiltra-se, outra evapora, e o restante volta a ser capturado pelo fluxo subterrâneo (Vasconcelos 1994). Logo, a equação do balanço hídrico fica da seguinte forma:

$$P = E + I_w \pm dW$$

A evapotranspiração real é o termo mais importante de um balanço hídrico, embora seja o menos conhecido. No caso de aquíferos livres, esse parâmetro constitui o termo principal de perda de água. Geralmente, sua determinação se dá através de formas empíricas, baseadas em fatores climáticos como temperatura média, altura da precipitação, insolação, entre outros. No estudo de aquíferos livres, a variação dos

fatores climáticos durante um ano hidrológico é de extrema importância para a avaliação da evapotranspiração real e para a altura média mensal da precipitação, sendo muito mais importante que dados anuais.

Segundo Thornthwaite & Mather (*apud* Vasconcelos 1994), a evapotranspiração potencial é obtida através da fórmula:

$$ETP = 16(10T/I)^a K$$

Onde:

T corresponde à temperatura;

I é o índice térmico;

K é um fator de correção relacionado à latitude.

O índice I é obtido através da equação $I = (T/5)^{1.5}$ e o termo "a" é obtido em função do índice térmico, sendo:

$$a = 0,49239 + 1792 \times 10^{-5} I - 771 \times 10^{-7} I^2 + 675 \times 10^{-9} I^3$$

Como ferramenta de auxílio no cálculo do balanço hídrico, foi utilizado o *software* Balasc, desenvolvido pelos pesquisadores Hilton Silveira Pinto e Zurandir Zullo Junior, ambos do Centro de Ensino e Pesquisa da Agricultura da UNICAMP.

4- RESULTADOS OBTIDOS

4.1- ESTUDO DO AQUIFERO LIVRE

4.1.1- Distribuição espacial

Através dos perfis das sondagens geotécnicas e das perfurações a trado manual foram realizadas correlações estratigráficas a fim de definir a distribuição espacial do aquífero livre. Os perfis apresentados nas figuras 9 e 10 ilustram o material que compõe o Grupo Barreiras e os Sedimentos Pós-Barreiras. De acordo com esses perfis, o contato entre as duas unidades é feito através de uma superfície plana, onde geralmente ocorrem clastos quartzosos bem desenvolvidos, além de níveis lateríticos, indicando a superfície erosiva do Grupo Barreiras onde foram depositados os Sedimentos Pós-Barreiras.

O aquífero livre é formado por sedimentos inconsolidados, mal selecionados, subangulosos, de coloração creme alaranjado chegando a cinza claro, cuja granulometria varia de areia fina siltosa a silto-argilosa até areia média a grossa com cascalho esparsos. A espessura desse aquífero encontra-se entre 5,6 a 19 metros (Figuras 9 e 10). O nível estático foi obtido através dos poços de monitoramento existentes na área e dos perfis de sondagem geotécnicas fornecidos pela ALBRAS. No período de maior incidência de chuvas, nas proximidades da ADRS, o nível d'água variou entre 0 a 5,30 metros; enquanto que no período seco a maior profundidade obtida foi de 8,0 metros.

Na figura 9, o perfil composto pelas sondagens SP-17, SP-18 e SP-19 apresenta um mergulho de aproximadamente 30° em forma anticlinal nos sedimentos argilosos e areno-siltosos com laterita onde foram parcialmente depositados os Sedimentos Pós-Barreiras; a partir da sondagem SP-19 até a SP-20, a seção torna-se praticamente plana.

De acordo com a figura 10, os sedimentos areno-siltosos com concreções lateríticas apresentam espessura praticamente constante e plana. A espessura permanece constante ao longo das sondagens SP-21, SP-22 e SP-23, em direção à SP-24. Esse tipo de feição é bastante característico tanto para os sedimentos do Grupo Barreiras como para os do Pós-Barreiras, sendo também facilmente identificados na região nordeste do Estado do Pará.

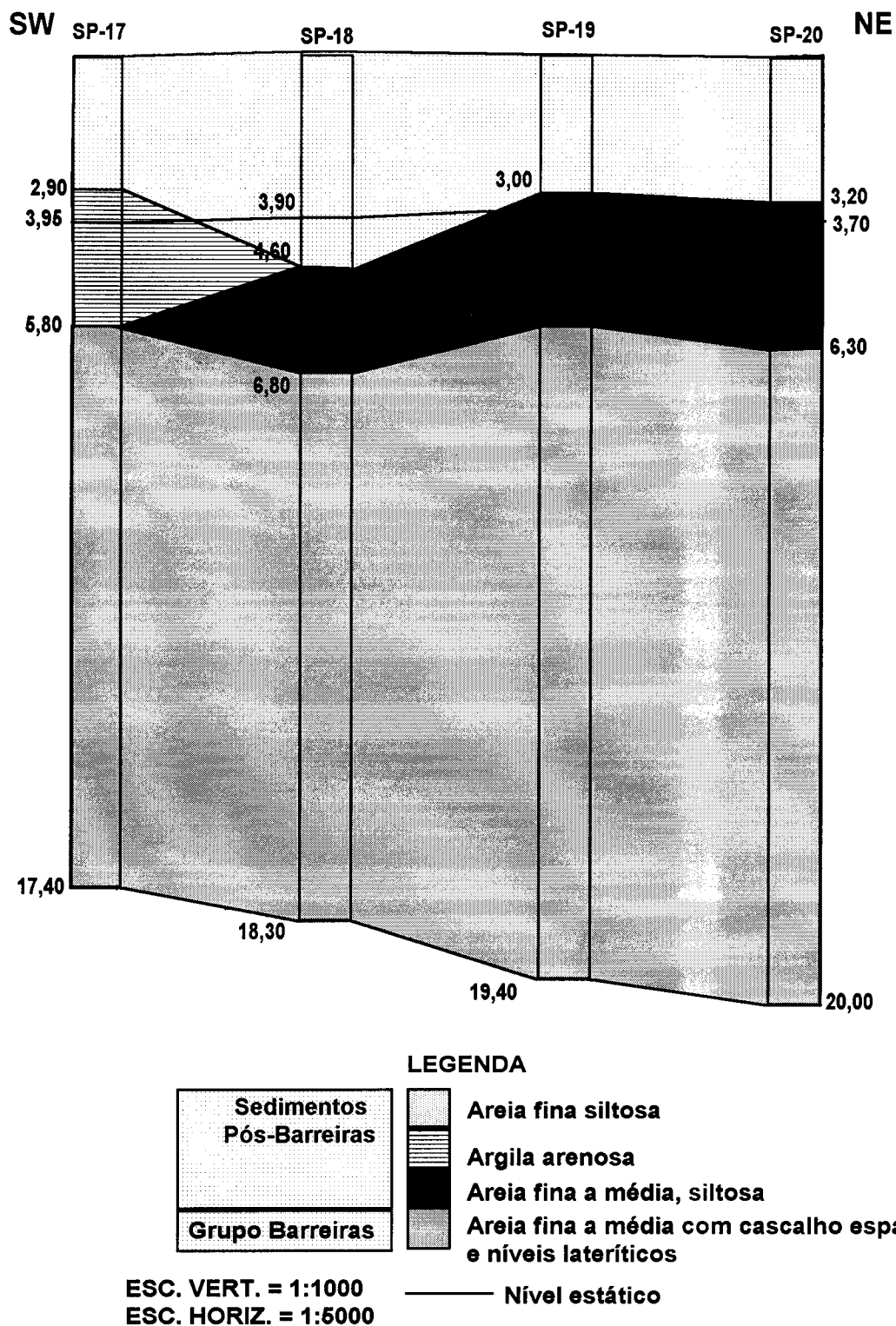


Figura 9- Perfil construído através da correlação entre as sondagens geotécnicas SP-17, SP-18, SP-19 e SP-20, demonstrando a relação de contato entre os Sedimentos Pós-Barreiras e o Grupo Barreiras na ADRS.

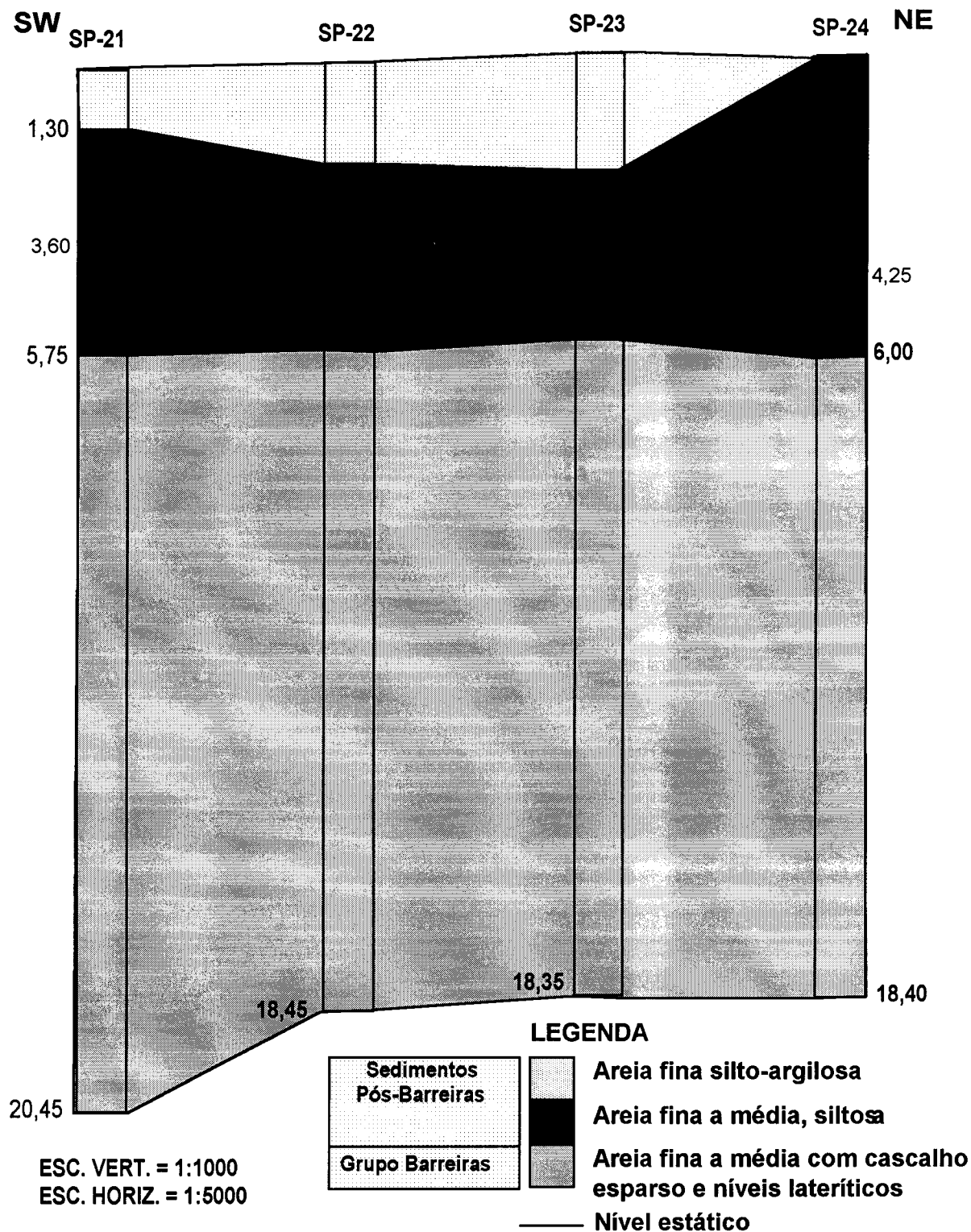


Figura 10- Perfil construído através da correlação entre as sondagens geotécnicas SP-21, SP-22, SP-23 e SP-24 demonstrando a relação de contato entre os Sedimentos Pós-Barreiras e o Grupo Barreiras na ADRS.

4.1.2- Fluxo subterrâneo

A velocidade do fluxo subterrâneo é um dos parâmetros mais importantes na avaliação de risco de contaminação das águas subterrâneas pois, juntamente com outras informações hidrogeológicas, é indispensável no estudo da evolução de plumas de contaminação.

No ensaio de bombeamento realizado, o rebaixamento do lençol freático foi medido no próprio poço bombeado, devido à inexistência de poços nas proximidades que pudessem ser utilizados para as medidas do rebaixamento. No entanto, pela relativa homogeneidade dos sedimentos que constituem o aquífero livre na área, fato este comprovado pelas diversas perfurações a trado realizadas, considerou-se válido extrapolar os resultados do ensaio para a ADRS. Os dados do teste foram interpretados utilizando-se o método de Cooper & Jacob (*apud* Driscoll 1987).

Embora o ensaio tenha tido uma duração de apenas 70 minutos (item 3.4.1), com esse tempo, os pontos obtidos no gráfico rebaixamento x tempo (s x t) exibiram um bom alinhamento (Figura 11), excluindo-se os minutos iniciais de bombeamento, o que possibilitou o cálculo da transmissividade (T) e da condutividade hidráulica (K) do aquífero livre avaliado.

A velocidade do fluxo subterrâneo (v) do aquífero livre da área de estudo foi obtida empregando a seguinte equação:

$$v = K \cdot i / \eta, \text{ onde:}$$

K → condutividade hidráulica

i → gradiente hidráulico

η_{ef} → porosidade efetiva para fluxo, aqui considerada igual a porosidade total (η).

A condutividade hidráulica (K) adotada para este cálculo foi a obtida a partir do ensaio de bombeamento, o gradiente hidráulico (i) foi obtido através da diferença entre a carga hidráulica dos poços 7 e 9, e a distância entre os mesmos (Figura 12). A porosidade total (η) foi estimada com base nas características granulométricas do material que compõe o aquífero, adotando-se o valor de 25% que, segundo Driscoll (1987), é típico de areias finas siltosas.

Obtendo-se, então:

$$v = 1,88 \times 0,01/0,25$$

$$v = 0,075 \text{ m/dia ou } 7,5 \text{ cm/dia}$$

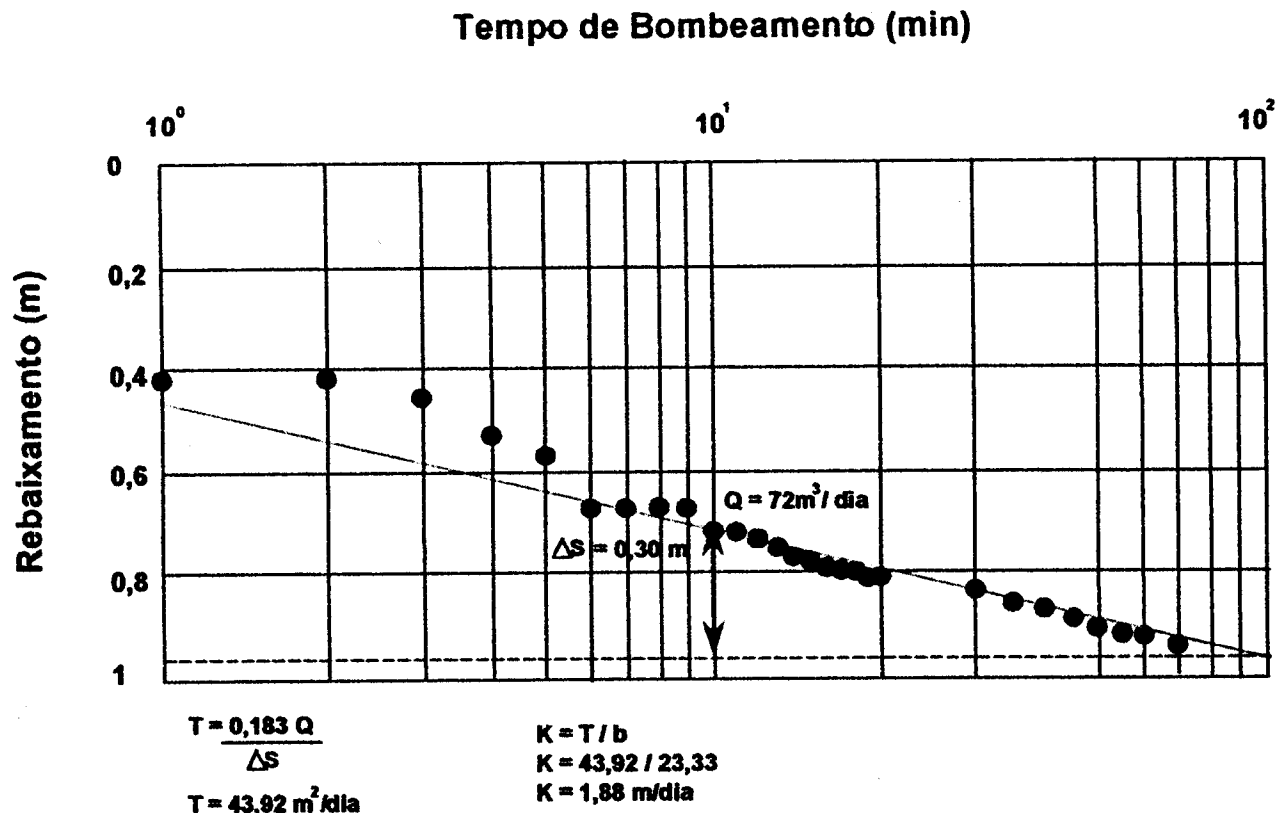


Figura 11- Gráfico do rebaixamento x tempo (s x t) obtido a partir do teste de bombeamento.

O valor encontrado é duas vezes e meia superior ao obtido por Araújo (2001) na cidade de Santa Isabel do Pará, também na região nordeste do estado, onde o autor identificou para o aquífero livre, constituído pelos Sedimentos Pós-Barreiras valores de velocidade do fluxo subterrâneo na ordem de 3 cm/dia. Essa diferença entre os valores pode ser atribuída à diferença entre os sedimentos que compõem a zona saturada nas duas regiões, uma vez que na área descrita por Araújo (2001) predominam silte arenoso e areia fina, enquanto que na área de disposição de resíduos sólidos da ALBRAS, os sedimentos da zona saturada são constituídos por areia grossa com cascalho esparso.

Com base no valor obtido para a velocidade do fluxo subterrâneo e considerando que as drenagens mais próximas à ADRS encontram-se a cerca de 500 metros de distância, pode-se dizer que caso um contaminante conservativo atinja o lençol freático, este levaria 6666 dias ou 18,26 anos para atingir as drenagens. Assim sendo, os processos de atenuação natural poderiam agir ao longo desse período a fim de que a carga contaminante não chegasse a atingir as águas superficiais. Além do mais, caso fosse necessário, um processo de remediação poderia ser implementado em tempo suficiente para que esta carga não chegasse às drenagens.

Foi elaborado ainda, o mapa potenciométrico para a área (Figura 13), referente ao período chuvoso. Foram utilizados os valores da carga hidráulica obtidos através das cotas topográficas e da profundidade da água referentes às sondagens geotécnicas, aos furos de trado e aos poços de monitoramento. A partir do mapa isopotenciométrico foram traçadas as linhas de fluxo, considerando o sentido do fluxo das áreas de maior para as de menor potencial.

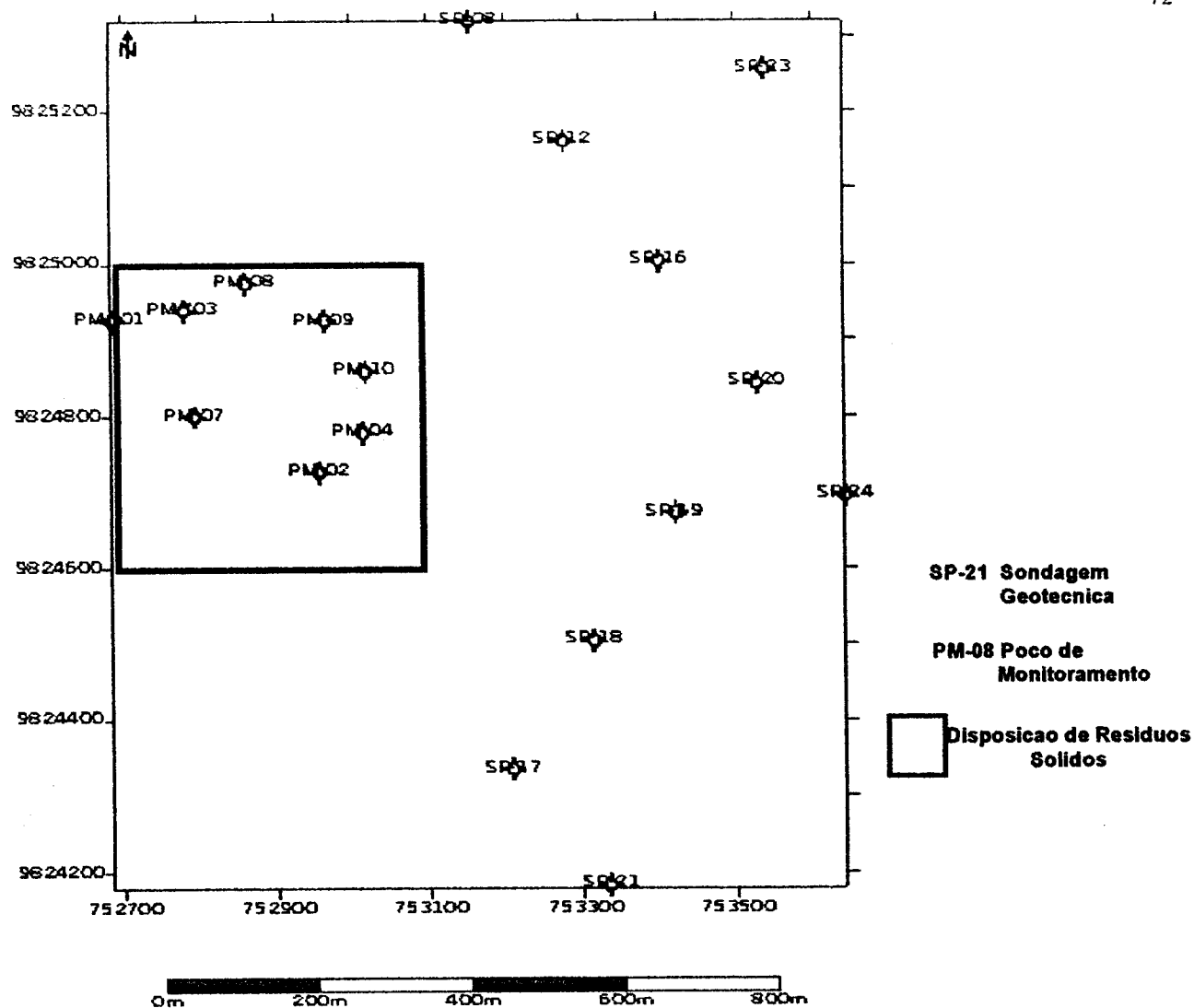


Figura 12- Localização dos furos de trado, poços de monitoramento e sondagens geotécnicas utilizados na caracterização litológica.

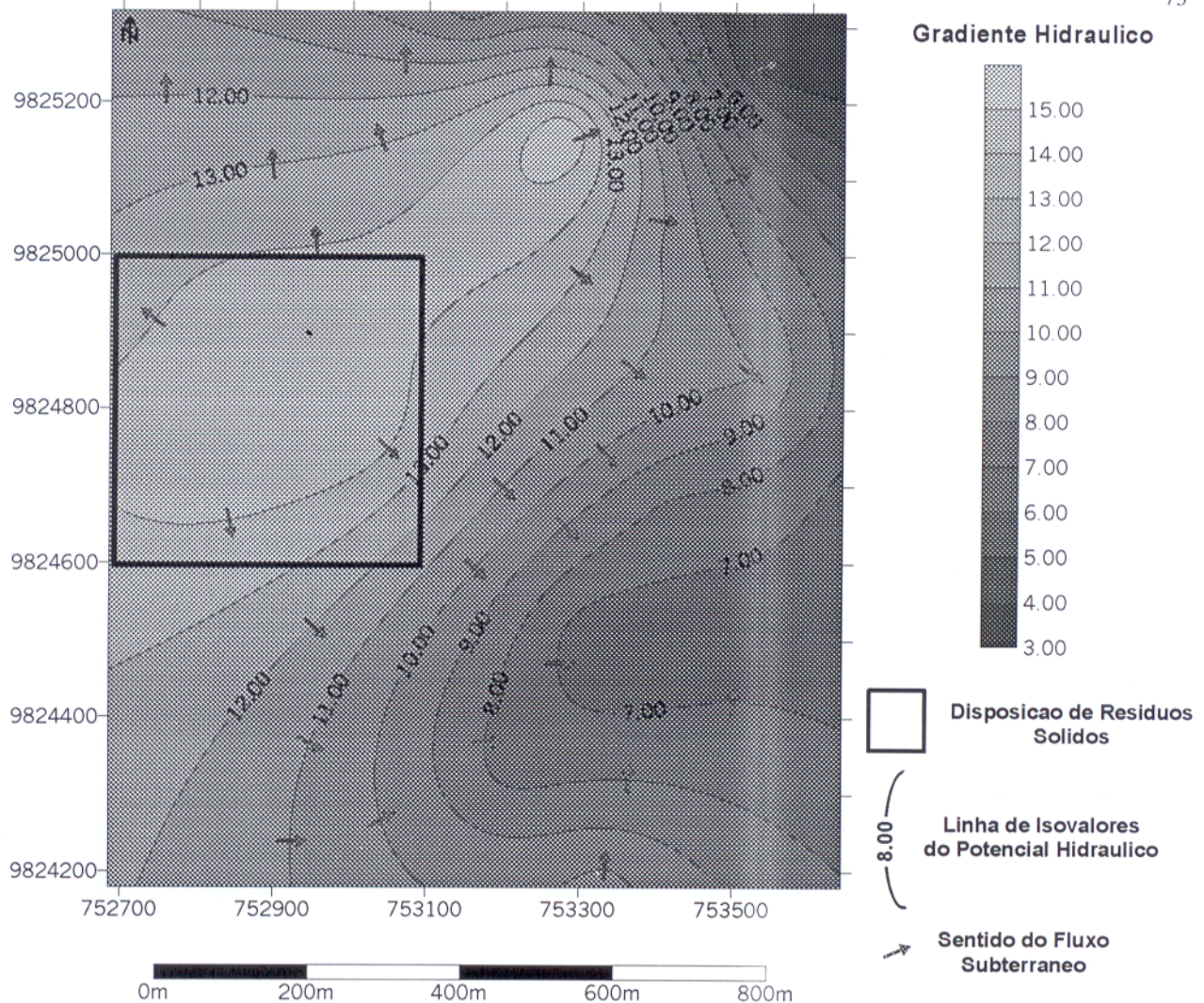


Figura 13- Fluxo subterrâneo na ADRS.

4.1.3- Caracterização litológica

A caracterização litológica dos sedimentos que constituem o aquífero livre foi realizada com base nas análises granulométricas realizadas nas amostras coletadas durante a realização de doze sondagens a trado manual, cuja localização encontra-se na figura 12, além dos dados obtidos através das sondagens realizadas durante a implantação da indústria e dos perfis dos poços de monitoramento (Figura 14).

As amostras foram coletadas a cada metro perfurado ou a intervalos menores, nos casos em que observou-se alguma mudança de litologia, seguindo os procedimentos básicos recomendados no Manual de Coleta do Solo (Lemos & Santos *apud* Rebouças 1999).

Os sedimentos foram dispostos sobre um recipiente plástico, homogeneizados e quarteados para se obter uma amostra de aproximadamente 1 kg, que foi acondicionada em sacos plásticos devidamente etiquetados. No laboratório de sedimentologia do Centro de Geociências as amostras foram secas e pesadas. Em seguida, o material grosso foi separado do mais fino por lavagem, para execução dos métodos de peneiramento e decantação por centrifugação.

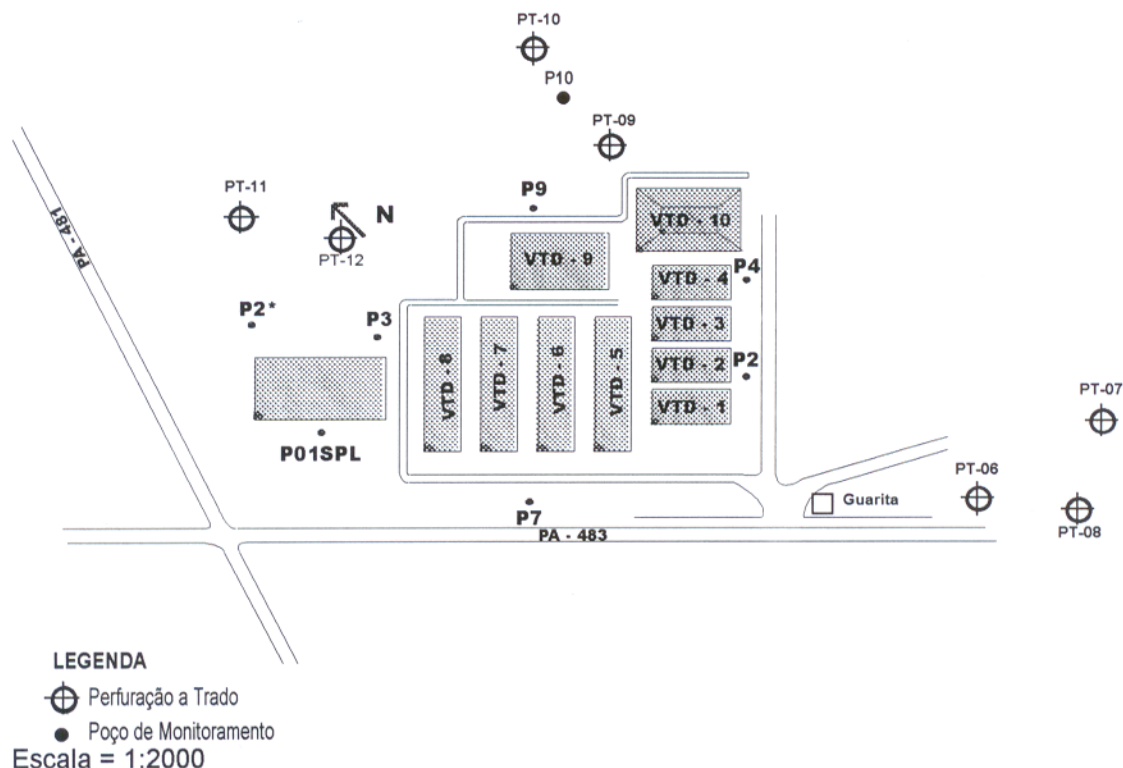


Figura 14- Localização aproximada das perfurações a trado PT1 a PT12.

A profundidade dos furos variou de 1,5 a 8,5 metros, e o resultado das análises granulométricas revelou uma grande similaridade entre os sedimentos analisados.

Com base na classificação de Folk (1976), os sedimentos coletados nos furos foram classificados como areia fina a muito fina, de acordo com o tamanho médio dos grãos. Sendo texturalmente classificados como areia siltosa, com variações de areia lamosa contendo cascalho esparsos. Todas as amostras se mostraram pobremente selecionadas. A Tabela 22 apresenta um resumo dos valores obtidos através da análise granulométrica para as doze perfurações a trado realizadas. Considerando-se a classificação pelo tamanho médio dos grãos (areia fina) os sedimentos apresentariam

valores de K na faixa de 10^{-3} a 10^{-5} cm/s (Tabela 23). Por outro lado, segundo a classificação de Folk (areia siltosa), a condutividade hidráulica estaria compreendida no intervalo de 10^{-4} a 10^{-6} cm/s (areia siltosa). Assim sendo, é coerente adotar um valor de K da ordem de 10^{-4} cm/s para os sedimentos da área. Destaca-se que esses valores são aproximados e que valores mais precisos da condutividade hidráulica da zona não saturada foram obtidos pelo método específico para esse fim, como o ensaio de permeabilidade (ABGE 1996).

Tabela 22- Caracterização granulométrica predominante dos sedimentos dos furos de trado.

Amostra	Classificação pela média	Classificação segundo Folk	Grau de Seleção
PT1-02	Areia fina	Areia siltosa	Pobre
PT1-09	Areia fina	Areia lamosa c/ cascalho esparsos	Pobre
PT2-01	Areia fina	Areia siltosa	Pobre
PT2-10	Areia fina	Areia lamosa c/ cascalho esparsos	Pobre
PT3-04	Areia fina	Areia siltosa	Moderada
PT3-06	Areia lamosa c/ cascalho esparsos	Areia lamosa	Moderada
PT6-01	Areia muito fina	Areia siltosa	Moderada
PT6-02	Areia muito fina	Areia siltosa	Moderada
PT7-01	Areia muito fina	Areia siltosa	Moderada
PT8-01	Areia muito fina	Areia siltosa	moderada
PT9-02	Areia fina	Areia siltosa	Moderada
PT10-01	Areia fina	Areia siltosa	Pobre
PT10-02	Areia fina	Areia siltosa	moderada

Tabela 23- Valores de condutividade hidráulica (K) em cm/s para alguns materiais geológicos (Fetter 1988).

MATERIAL	K(cm/s)
Cascalho bem selecionado	$1 \text{ a } 10^{-2}$
Areia bem selecionada	$10^{-1} \text{ a } 10^{-3}$
Silte arenoso, areia fina	$10^{-3} \text{ a } 10^{-5}$
Silte, areia siltica, argila arenosa	$10^{-4} \text{ a } 10^{-6}$

4.1.4- Ensaios de infiltração

Para a determinação da permeabilidade da zona não saturada, indispensável ao conhecimento da migração de contaminantes em subsuperfície, foram realizados ensaios de rebaixamento, empregando-se a metodologia recomendada pela ABGE (1996), cuja descrição detalhada foi apresentada no capítulo 3.

Os testes de infiltração foram realizados nos locais das perfurações a trado PT7, PT10 e PT11.

De acordo com o item 3.5, a condutividade hidráulica é obtida através da fórmula

$$K = \frac{\Delta h}{\Delta t} \times \frac{d_1^2}{8h_0 \sqrt{d_0 L}}$$

A Tabela 24 apresenta os dados utilizados nos ensaios de permeabilidade na ADRS.

Tabela 24- Furos de trado e propriedades utilizadas nos ensaios de rebaixamento (ABGE 1996) na ADRS.

Furo	d_0	d_1	L (cm)	Δh (cm)	Δt (seg)	h_0 (cm)
PT7	12,7	10,16	185	89	1980	92,5
PT10	15	12,3	150	149,1	2400	125
PT11	15	12,3	60	364,5	2400	80

Os valores obtidos para a condutividade hidráulica, nos sedimentos que compõem a zona vadosa local encontram-se na tabela 25.

Tabela 25- Valores da condutividade hidráulica obtidos através de ensaios de infiltração nas perfurações a trado PT7, PT10 e PT11.

Perfuração a Trado	K (cm/s)	K (m/dia)
PT7	$1,28 \times 10^{-4}$	0,1107
PT10	$2,70 \times 10^{-4}$	0,2332
PT11	$1,19 \times 10^{-4}$	0,1028

Utilizando-se a classificação proposta por Dawson & Istok (*apud* Rebouças 1999) os valores de condutividade hidráulica acima definidos correspondem a sedimentos cujo tamanho dos grãos varia entre areia média a fina, areia média siltosa até areia média argilosa. Na classificação apresentada por Fetter (1988), valores de K situados

entre 10^{-3} a 10^{-5} cm/s correspondem a um material que vai desde silte arenoso até areia fina.

No entanto observou-se que o valor da condutividade hidráulica obtido através do ensaio de bombeamento (1,88 m/dia – item 4.1.1) foi bem superior aos valores calculados para a zona não saturada. Essa diferença deve ocorrer devido à variação granulométrica com a profundidade, uma vez que, nas camadas superiores predominam areias finas siltosas, enquanto que a maiores profundidades, ocorre areia média a grossa com cascalho esparso. Além do mais, o poço onde foi realizado o teste de bombeamento, possui cerca de 28 metros de profundidade, devendo captar predominantemente sedimentos mais grosseiros do que aqueles que constituem as camadas superiores.

4.2- MAPAS DE VULNERABILIDADE À CONTAMINAÇÃO

4.2.1- Método GOD

O método GOD, desenvolvido por Foster & Hirata (1993), utiliza três parâmetros para a determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos, sendo estes o tipo de aquífero (índice G), o litotipo da zona não saturada (índice O) e a profundidade do nível estático (índice D). A cada parâmetro é atribuído um valor que, quando multiplicados entre si, fornecem o índice de vulnerabilidade final para o aquífero estudado.

Na Área de Disposição dos Resíduos Sólidos (ADRS), o litotipo da zona não saturada (Índice O) foi caracterizado através de perfurações a trado manual, além de perfis de sondagens geotécnicas. A profundidade do nível estático (Índice D) foi obtida diretamente através dos poços de monitoramento instalados na área e indiretamente através dos valores das tabelas das sondagens geotécnicas durante o período chuvoso. De posse desses dados, tornou-se possível classificar o tipo de ocorrência das águas subterrâneas (Índice G), compondo assim, os parâmetros necessários para determinar a vulnerabilidade do aquífero em estudo. A Tabela 26 apresenta todos os parâmetros envolvidos na determinação da vulnerabilidade do aquífero na ADRS e seus respectivos índices atribuídos, através do modelo GOD (Foster & Hirata 1993).

Tabela 26- Parâmetros utilizados e seus respectivos valores para determinar a vulnerabilidade na ADRS, através do método GOD.

Sondagem	Leste	Norte	Profundidade do NE	Índice da Profundidade	Grau de Confinamento	Litotipo	Índice de Vulnerabilidade
SP -08	753155,3	9825319	4,4	0,9	1	0,65	0,585
SP -12	753278	9825161	0	0,9	1	0,65	0,585
SP -16	753400,9	9825003	5,1	0,8	1	0,65	0,52
SP -17	753207,1	9824335	4,4	0,9	1	0,65	0,585
SP -18	753313,6	9824504	4,65	0,9	1	0,65	0,585
SP -19	753420,1	9824674	4,2	0,9	1	0,65	0,585
SP -20	753526,6	9824843	3,95	0,9	1	0,65	0,585
SP -21	753332,9	9824183	3,6	0,9	1	0,65	0,585
SP -23	753539,8	9825256	4,6	0,9	1	0,65	0,585
SP -24	753643,3	9824696	4,25	0,9	1	0,65	0,585
PM-10	753017	9824858	2,85	0,9	0,7	0,65	0,409
PM-*01	752685,4	9824926	1,6	0,9	1	0,6	0,54
PM-*03	752780,9	9824939	1,85	0,9	1	0,6	0,54
PM-02	752956,2	9824727	2,55	0,9	1	0,6	0,54
PM-04	753013,5	9824778	2,1	0,9	1	0,6	0,54
PM-07	752793,3	9824800	3,05	0,9	1	0,6	0,54
PM-08	752861,8	9824975	1,8	0,9	1	0,6	0,54
PM-09	752965,2	9824925	2,65	0,9	0,7	0,6	0,378

O aquífero em estudo é predominantemente livre. No entanto; observou-se, através dos perfis de sondagens geotécnicas e dos furos a trado manual a presença de pequenas lentes argilosas que podem fornecer alguma proteção ao aquífero, porém de forma muito localizada. Nessas áreas, pequenas e restritas, o aquífero foi considerado livre com cobertura, de acordo com a metodologia proposta por Foster & Hirata (1993). Portanto, para o índice "G" (tipo de aquífero) foram adotados valores de 0.7 nas áreas onde o aquífero apresenta essa pequena proteção natural, enquanto que os valores

adotados no resto da área, onde o aquífero encontra-se totalmente livre, foram de 1.0 (Tabela 26). A partir desses índices foi construído o mapa diferenciando com essas características (Figura 15). De acordo com o observado, o parâmetro G apresentou a sensibilidade esperada para esta escala de mapeamento, uma vez que foi possível identificar os dois diferentes tipos de aquífero dentro de uma área de pequenas proporções como a investigada. Logo, a aplicação do método se fez válida.

Os sedimentos da área apresentam-se bastante uniformes, havendo predominância de material areno-siltoso a areno-silto-argiloso. Tendo como base o critério adotado por Fernández & Arensburg (1994); que dividiram a zona não saturada em duas categorias, considerou-se para o presente trabalho uma zona constituída por areia fina siltosa (afs), e outra por areia fina siltosa pouco argilosa (afsa), cujos valores atribuídos ao índice "O" (litotipo da zona não saturada) foram 0.65 e 0.6, respectivamente (Tabela 26). A partir desses valores, foi confeccionado então o mapa de litotipo na área enfocada (Figura 16). Com base nesse mapa, pode-se novamente comprovar a eficácia do método para a escala utilizada, uma vez que foi possível diferenciar espacialmente dois litotipos distintos compondo o parâmetro O.

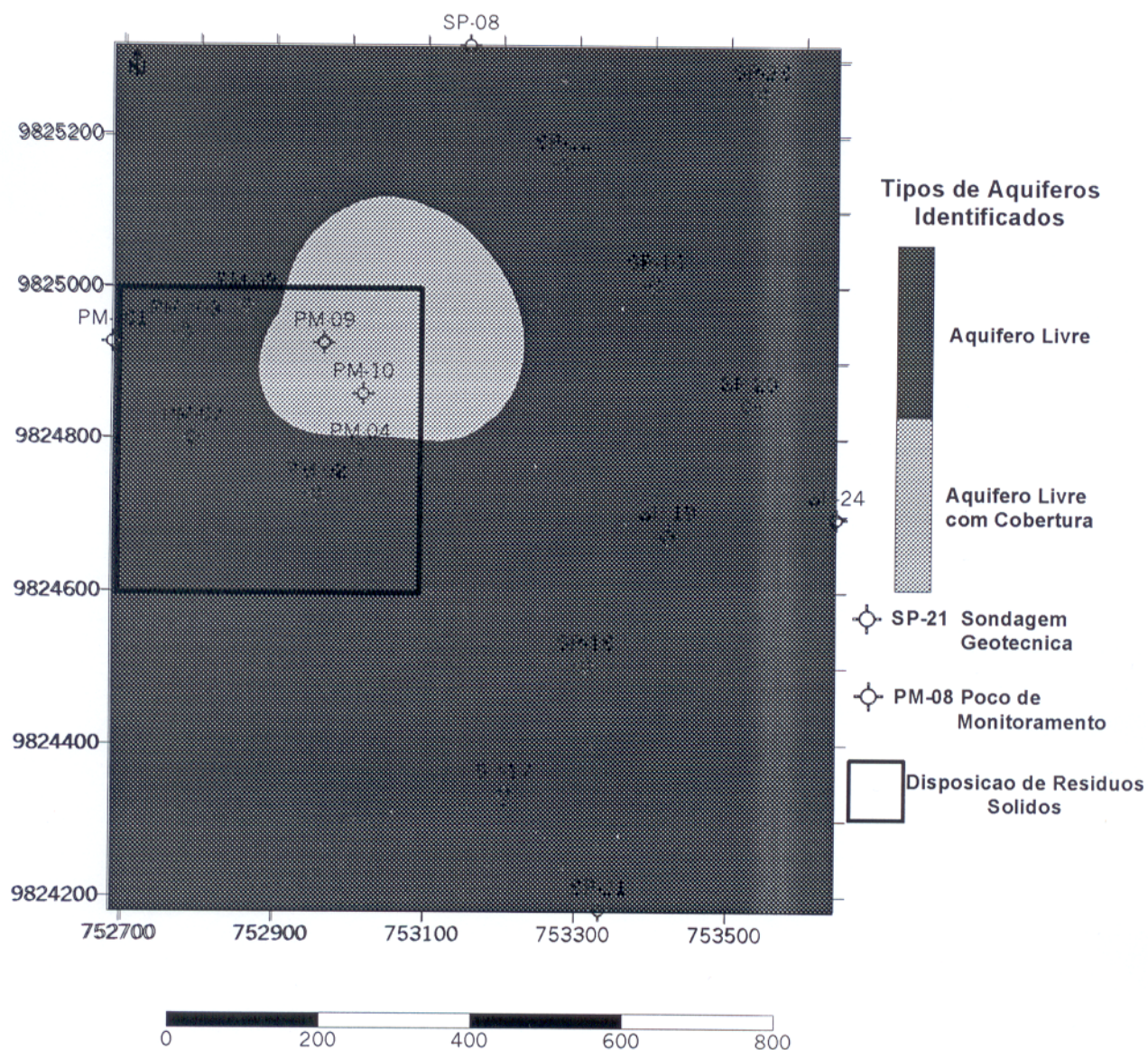


Figura 15- Tipos de aquífero identificados na ADRS.

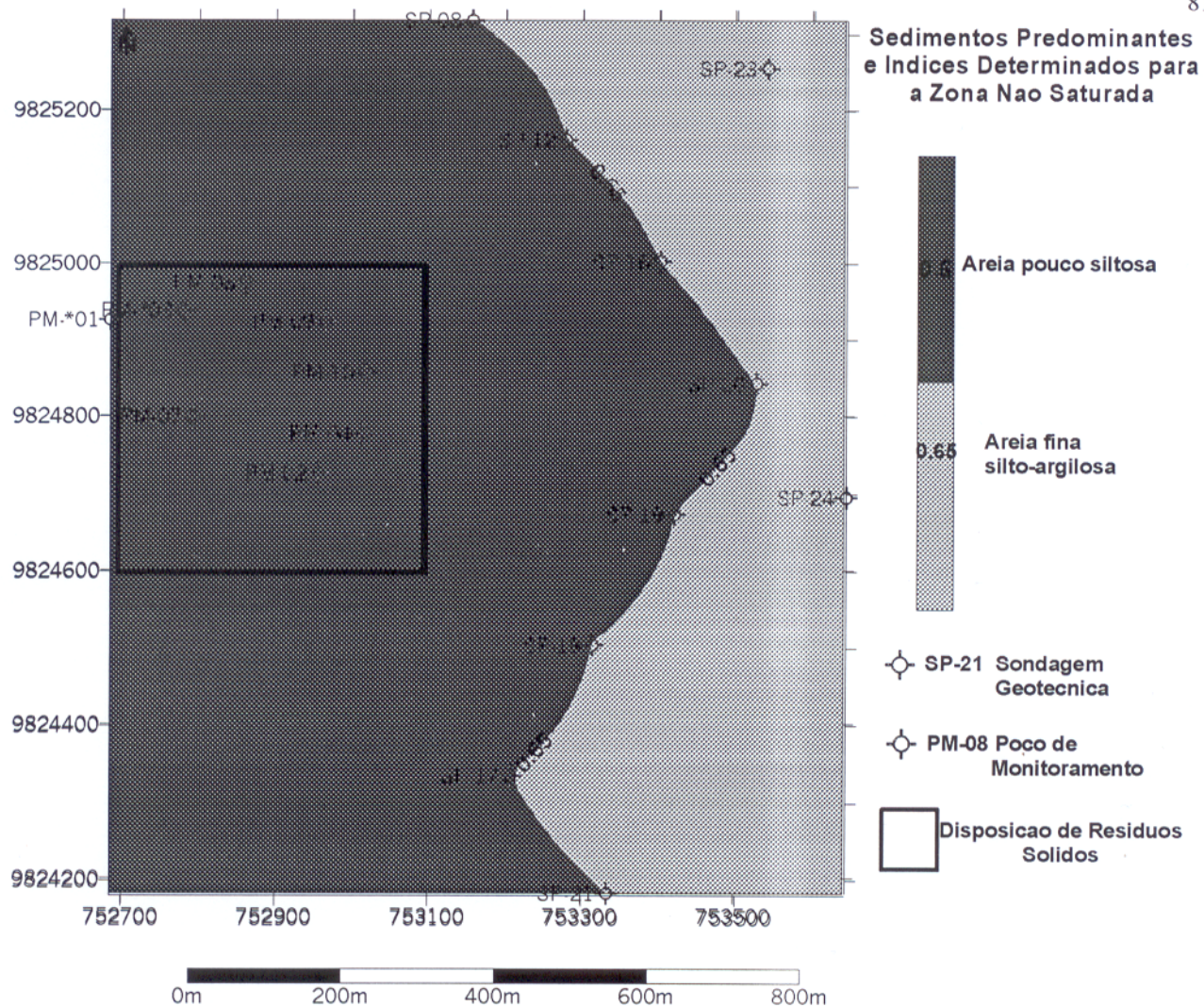


Figura 16- Sedimentos inconsolidados da zona não saturada.

Para o índice "D" (profundidade do nível estático) foram inferidos os valores de 0.9 onde o nível estático encontrava-se a profundidades inferiores a 5 metros, e 0.8 onde o nível da água encontrava-se entre 5 a 10 metros de profundidade (Tabela 26). A partir desses índices, foi construído o mapa de profundidade do nível estático, apresentado na figura 17. Considerando-se o mapa obtido, o nível estático apresentou variações possíveis de serem identificadas na escala utilizada, uma vez que este parâmetro apresentou-se em um intervalo de profundidade entre 0 a 5.1 m. Esse resultado é importante pois constitui uma ferramenta para tomada de decisões por parte da ALBRAS, particularmente no que concerne à seleção de locais para a construção de

novos valos de disposição de resíduos sólidos. Portanto, mesmo em se tratando de uma área cujas extensões podem ser consideradas reduzidas para a aplicação do método, o resultado atingido pode ser considerado satisfatório.

Com os três parâmetros definidos e multiplicados entre si os índices inferidos a cada um, foram obtidos os graus de vulnerabilidade final para o aquífero livre na área estudada, cujos valores variam de 0.585 a 0.378, correspondendo portanto, a índices de alta a moderada vulnerabilidade, respectivamente (Figura 18). Assim como os demais parâmetros investigados durante a avaliação da vulnerabilidade natural do aquífero livre, foi possível distinguir na área dois valores relativamente distintos para os índices finais de vulnerabilidade, demonstrando que mesmo em micro-escala é válido aplicar-se este tipo de metodologia, não somente a fim de ampliar o conhecimento hidrogeológico local; mas com o intuito mais nobre de proteger o meio ambiente assim como o bem estar da população local.

Analisando o mapa de vulnerabilidade natural como um todo, a área de disposição de resíduos sólidos (ADRS) encontra-se sobre uma área de moderada a alta vulnerabilidade. Portanto, a construção de valos de disposição de resíduos sólidos nessa área requer a adoção de técnicas de construção que garantam a proteção do meio ambiente. Ressalta-se que além de adotar normas técnicas na construção dos valos já construídos na ADRS, a ALBRAS também desenvolve o monitoramento sistemático da qualidade da água do aquífero livre nessa área, através de poços ali instalados com essa finalidade.

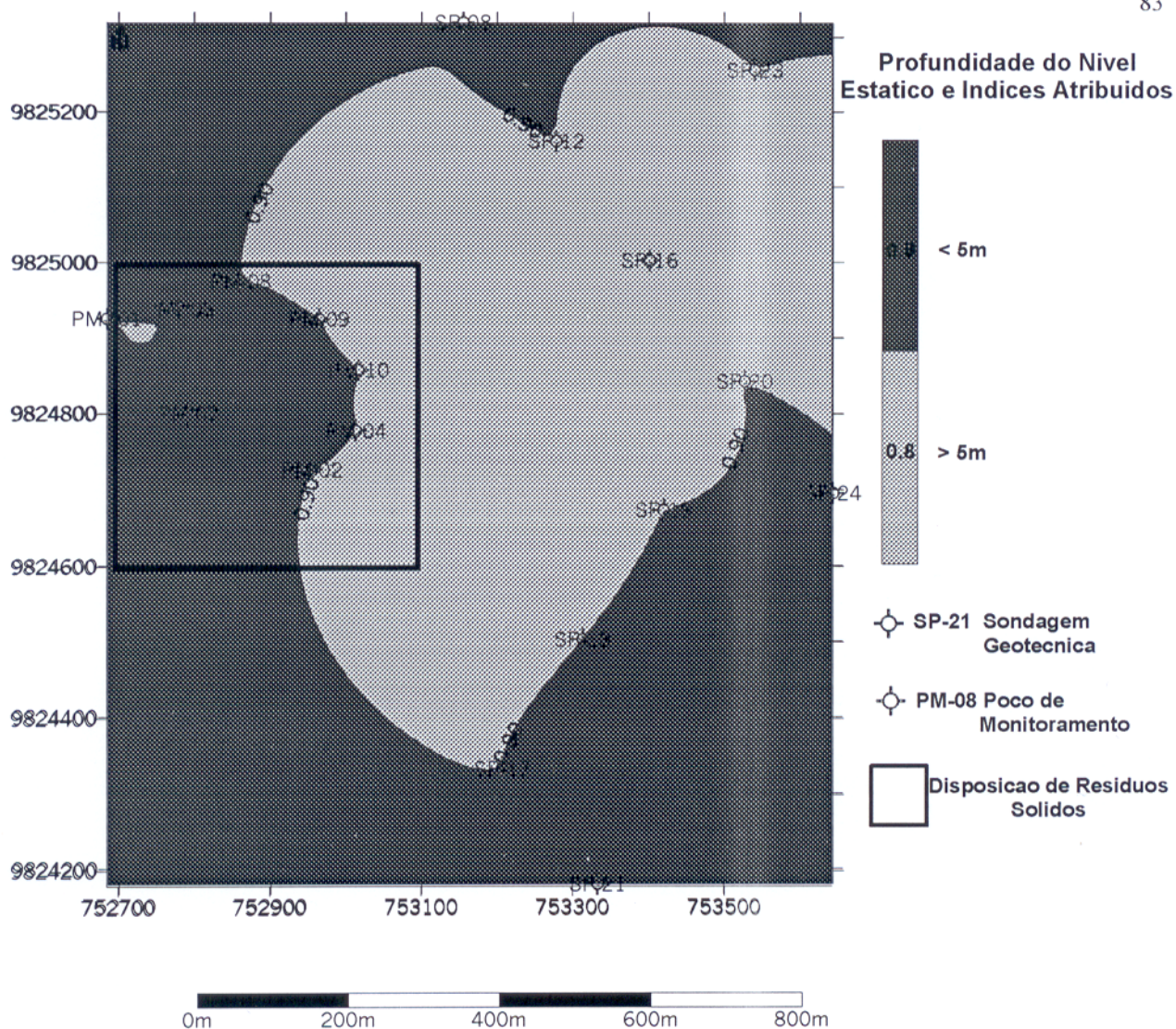


Figura 17- Profundidade do nível estático no local das ADRS.

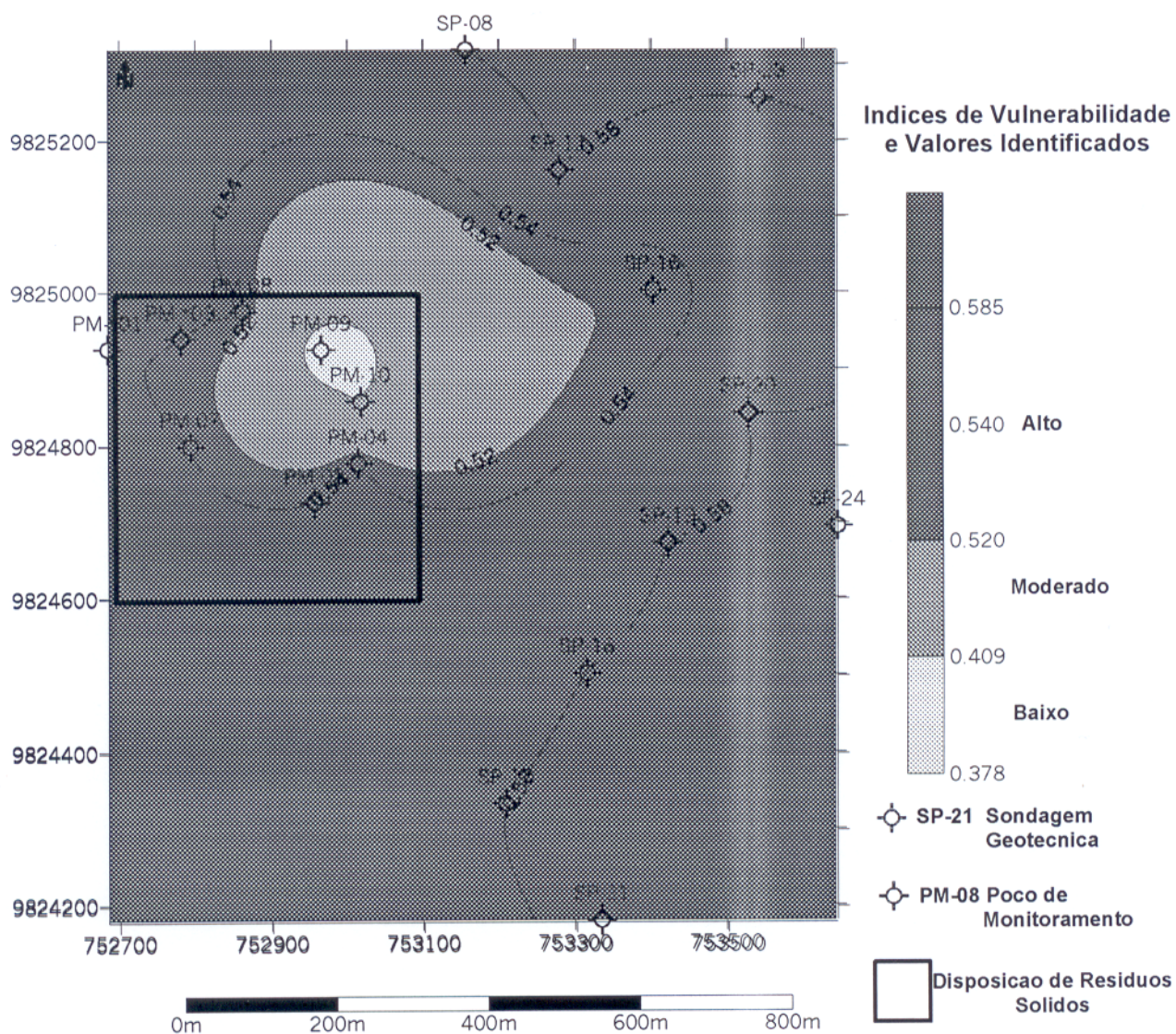


Figura 18- Vulnerabilidade do aquífero livre na ADRS.

Diante do mapa de vulnerabilidade final obtido através do método GOD, depreende-se que para definir locais destinados à construção de novos valos na ADRS, se faz necessário analisar cada critério utilizado no mapeamento a fim de identificar qual deles poderia contribuir para essa tomada de decisão.

De acordo com o que foi descrito anteriormente, o litotipo da zona não saturada apresenta grande homogeneidade granulométrica, com sedimentos predominantemente arenosos, não representando, portanto, uma boa proteção natural ao sistema. O tipo de aquífero identificado é predominantemente livre, com uma pequena e localizada proteção argilosa. Logo, esse critério não deve ser levado em consideração, uma vez que esse tipo de aquífero é o mais vulnerável à contaminação. Por sua vez, a profundidade do nível estático apresentou-se como sendo o melhor parâmetro para a escolha de locais para a construção de novos *sites* de acordo com o modelo aplicado, uma vez que foi possível identificar uma zona onde a água subterrânea encontra-se a maiores profundidades, aumentando assim a distância entre uma suposta fonte de contaminação em superfície e o nível estático do aquífero.

4.2.2- Modelo DRASTIC

Para o modelo DRASTIC, o ápice da avaliação de qualquer ambiente hidrogeológico é um valor numérico denominado "ÍNDICE DRASTIC", sendo que, quanto maior o seu valor, maior será o potencial de contaminação das águas subterrâneas. Este sistema foi desenvolvido para fornecer um valor numérico relativo que pode ser rapidamente comparado a um outro valor obtido em outro local da mesma região, ou até mesmo em outra região distante. Como resultado obtido, por exemplo, pode ser atingido um total de 160 para o índice DRASTIC, sendo que, esse número não representa nenhum valor intrínseco. No entanto, adquire um significado quando comparado a valores de índices DRASTIC provenientes de outras áreas. Os valores desses índices, determinados por Aller *et al.* (1987) variam entre 65 a 223 para os principais ambientes hidrogeológicos.

Neste estudo foram utilizados quase todos os parâmetros descritos na metodologia, com exceção do índice S (tipo de solo), uma vez que este foi considerando como parte integrante da zona não saturada.

Foram utilizadas nos mapas as cores padrões aplicadas nos Estados Unidos, a fim de separar cada parâmetro adotado pelo método. No entanto, como cada fator apresenta variações dentro de seus valores identificados, foram utilizadas diversas tonalidades, para cada cor, sendo estas: Cinza (Índice D), verde (Índice R), vermelho (Índice A), azul (Índice T), marrom (Índice I) e laranja (Índice C).

4.2.2.1- Índices DRASTIC

Dentro da área de disposição dos resíduos sólidos da ALBRAS, a profundidade do nível estático (Índice D), foi obtida através da observação em poços de monitoramento e nas tabelas com os dados de sondagem geotécnica, sendo considerados os valores obtidos no período chuvoso, época em que o nível da água variou entre 0 a 5,1. A partir desses valores, foram obtidos pesos entre 35, 40, 45 e 50 (Tabela 27) para esse parâmetro através da multiplicação entre os índices Dp e Dc. De posse dos índices obtidos, foi então construído o mapa de profundidade do nível estático, apresentado na figura 19.

Tabela 27- Valores obtidos para o nível estático com os respectivos valores do peso (Dp) e dos valores atribuídos (Dc) com o índice da profundidade (Dp x Dc).

Sondagem	Coordenadas		Nível Estático (m)	Peso (Dp)	Valor Atribuído (Dc)	Índices da Profundidade
	Leste	Norte				
SP -08	753155,3	9825319	4,4	5	9	45
SP -12	753278	9825161	0	5	10	50
SP -16	753400,9	9825003	5	5	7	35
SP -17	753207,1	9824335	4,4	5	9	45
SP -18	753313,6	9824504	4,65	5	7	35
SP -19	753420,1	9824674	4,2	5	9	45
SP -20	753526,6	9824843	3,95	5	9	45
SP -21	753332,9	9824183	3,6	5	9	45
SP -23	753539,8	9825256	4,6	5	7	35
SP -24	753643,3	9824696	4,25	5	9	45

PM-10	753017	9824858	2,85	5	9	45
PM-*01	752685,4	9824926	1,6	5	9	40
PM-*03	752780,9	9824939	1,85	5	9	45
PM-02	752956,2	9824727	2,55	5	9	45
PM-04	753013,5	9824778	2,1	5	9	45
PM-07	752793,3	9824800	3,05	5	9	45
PM-08	752861,8	9824975	1,8	5	9	45
PM-09	752965,2	9824925	2,65	5	9	45

Os pesos obtidos para a profundidade do nível estático através do método DRASTIC apresentaram uma melhor visualização em relação ao modelo GOD por estarem separados através de intervalos menores em relação ao modelo brasileiro, adequando-se, portanto, melhor para estudos em nível de detalhe como o presente.

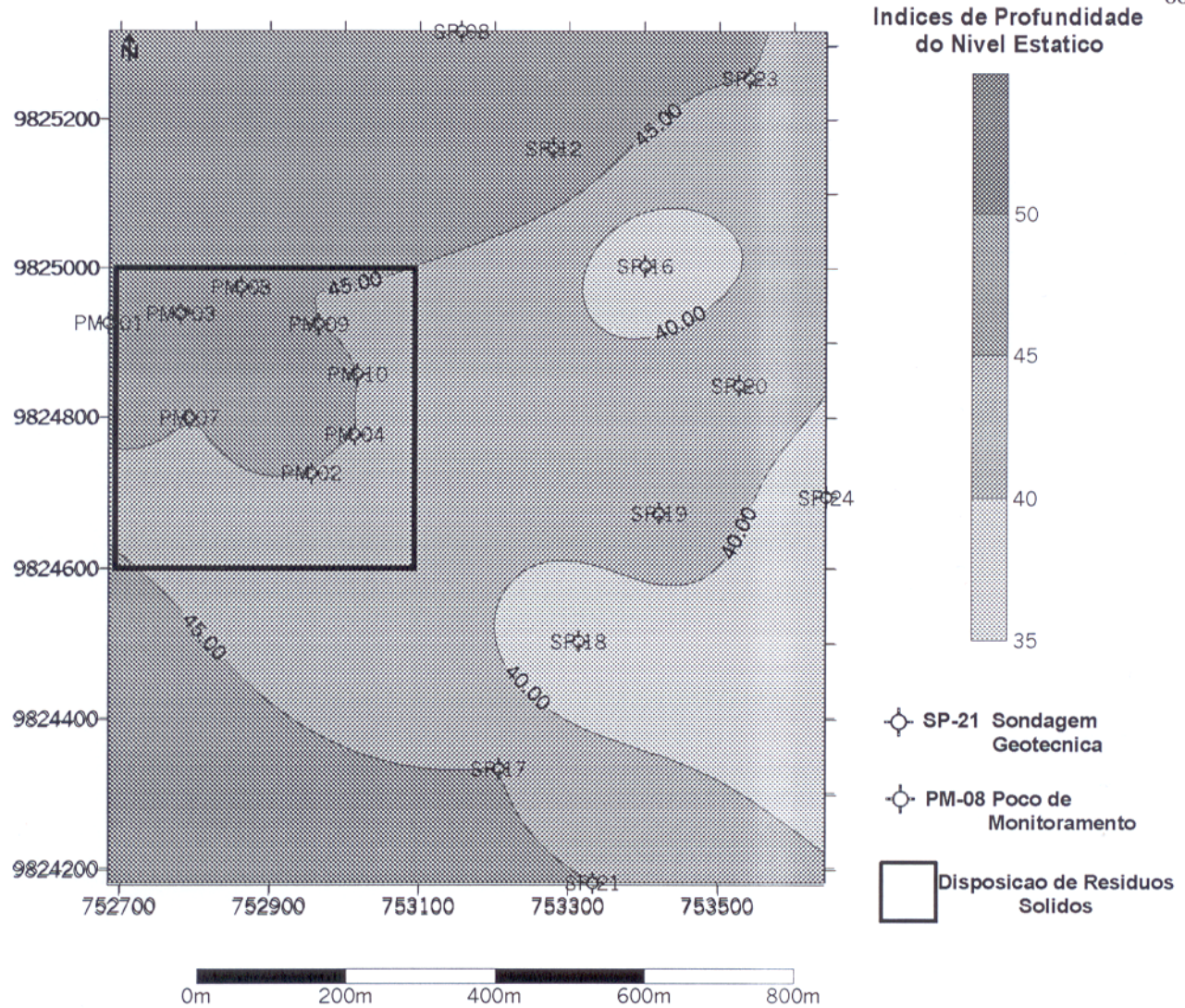


Figura 19- Índices de profundidade do nível estático obtidos na ADRS.

Para a obtenção da recarga (Índice R) do aquífero livre, foi realizado um balanço hídrico. No entanto, como não há uma estação meteorológica instalada na região de Barcarena, foram utilizados os valores da Região Metropolitana de Belém para obtenção desse parâmetro. Os valores obtidos são válidos para a área estudada, devido à sua proximidade em relação a Belém e à homogeneidade do clima local. Na realização do balanço hídrico, foi utilizada a metodologia proposta por Thonrtwaithe & Mather (*apud* Vasconcelos 1994).

O balanço hídrico consiste essencialmente na determinação dos parâmetros do ciclo hidrológico em uma determinada área. Neste ciclo, a água muda não somente de local, mas também de estado (Tancredi 1996).

No balanço hídrico, foram utilizados como parâmetros a evapotranspiração potencial mensal, as precipitações mensais, o saldo entre a precipitação e a evapotranspiração potencial, a soma dos valores negativos acumulados, a retenção da umidade, o armazenamento pluviométrico de cada mês, a evapotranspiração real e o excedente, além do valor da reserva hídrica que foi de 150 mm.

Tabela 28- Parâmetros utilizados para a determinação da Evapotranspiração Real na Região Metropolitana de Belém (Inmet 1992) através da metodologia desenvolvida por Thonrtwaithe & Mather (*apud* Vasconcelos 1994) com auxílio do software Balasc.

		1	2	3	4	5	6	7	8	9
MÊS	TEM P	EP	P	P- EP	NEG. AC.	ARMAZ.	ALT	ER (P+ALT)	DEF EP-ER	EXC (P- EP)- (ER)
JAN	26,6	136	366,5	231	0	2893	0	136	0	231
FEV	24,5	102	417,5	316	0	2893	0	102	0	316
MAR	25,5	117	436,2	319	0	2893	0	117	0	319
ABR	26,7	138	360	222	0	2893	0	138	0	222
MAI	25,9	124	304,4	181	0	2893	0	124	0	181
JUN	25,9	127	140,2	17	0	2893	0	127	0	17

JUL	25,8	122	152,1	30	0	2893	0	122	0	30
AGO	26,0	125	131,1	6	0	2893	0	125	0	6
SET	26,1	127	140,8	14	0	2893	0	127	0	14
OUT	26,4	132	116,11	- 16	- 16	2877	- 16	132	0	0
NOV	26,4	132	111,8	- 21	- 21	2857	- 20	132	-21,78	0
DEZ	26,1	127	216,4	89	0	2893	0	127	0	53
Total anual		1509	2893,11							
Média anual	26	125,75	241,09							

LEGENDA:

COLUNA 1- Evapotranspiração Potencial Mensal

COLUNA 2- Precipitações Mensais

COLUNA 3- Saldo negativo entre a precipitação e a evapotranspiração potencial

COLUNA 4- Soma dos valores negativos acumulados de $P - EP$

COLUNA 5- Retenção da umidade (mm)

COLUNA 6- Corresponde ao armazenamento do mês em questão menos o armazenamento do mês anterior

COLUNA 7- A evapotranspiração real é igual a potencial quando o armazenamento é total

Quando $P - EP$ for negativo, a ER é igual a soma das colunas P e ALT, sem considerar o sinal

COLUNA 8- Equivale a $EP - ER$

COLUNA 9- EXC. É sempre zero quando não ocorre armazenamento máximo. Quando o armazenamento for máximo, o EXC corresponde à diferença entre $(P - EP) - ER$

Através dos valores da precipitação e da evapotranspiração real, foi obtido o índice de infiltração, com os dados dos anos de 1969 a 1990.

Os valores obtidos através do método de Thornthwaithe & Mather (*apud* Vasconcelos 1994) foram portanto:

Temperatura = 26°C

EP = 1509 mm

$$P = 2893 \text{ mm}$$

$$P - EP = 1387 \text{ mm}$$

$$ER = 1506$$

$$EXC = 1387$$

Para calcular a taxa de infiltração da água no solo, que representa a recarga do aquífero livre em estudo, foi subtraído do valor da precipitação anual o valor obtido para a evapotranspiração real;

$$\text{Logo: } I = P - ER$$

$$I = 2893 - 1509$$

$I = 1384 \text{ mm/ano}$ com média de $115,33 \text{ mm/mês}$, o que representa $47,84\%$ do valor total da precipitação média.

Esse valor da taxa de infiltração quando comparado a outros trabalhos realizados em regiões próximas, mostra-se bastante compatível. Na bacia hidrográfica do igarapé São Brás, na região de Santarém, oeste do Estado do Pará onde Tancredi (1996) realizou o balanço hídrico local através do método de Thornthwaite & Matter *apud* Vasconcelos (1994) obtendo um valor de cerca de $35,4\%$ da precipitação para a taxa de recarga do aquífero livre. Em trabalho na bacia hidrográfica do igarapé Mata Fome, inserida na Região Metropolitana de Belém (PA), distante cerca de 30 km da área estudada na presente dissertação, Gaspar (2001) avaliou o impacto urbano na área da bacia hidrográfica, obtendo taxas de recarga de cerca de 50% da precipitação para as áreas mais preservadas, enquanto que nas áreas mais atingidas pela urbanização a percentagem de precipitação infiltrada se mostrou próxima a 32% . A Tabela 28 apresenta os valores da taxa de infiltração obtida através do balanço hídrico com seus respectivos pesos e valores atribuídos. Na figura 20 apresenta-se o mapa com a recarga para o aquífero livre estudado.

Sem dúvida alguma, a taxa de recarga do aquífero livre foi o parâmetro que apresentou menor sensibilidade em relação aos demais na avaliação da vulnerabilidade natural do sistema. Considerando uma área com proporções tão reduzidas, sequer poderia ser esperada alguma variação nos valores encontrados, pois, tendo em vista o método adotado para a obtenção da taxa de infiltração (balanço hídrico), tal fato só poderia ser identificado em uma escala regional de trabalho. No entanto, a aplicação

desse parâmetro se fez válida, pois tornou-se possível conhecer o seu valor e verificar que este se enquadra perfeitamente aos padrões regionais identificados por outros autores.

Tabela 29- Valores obtidos para a recarga com os respectivos valores do peso (Rp) e dos valores atribuídos (Rc) com o índice da Recarga (Rp x Rc).

Sondagem	Coordenadas		Taxa de Infiltração (mm/ano)	Peso (Rp)	Valor Atribuído (Rc)	Índice da Recarga
	Leste	Norte				
SP -08	753155,3	9825319	102 -178	4	6	24
SP -12	753278	9825161	102 -178	4	6	24
SP -16	753400,9	9825003	102 -178	4	6	24
SP -17	753207,1	9824335	102 -178	4	6	24
SP -18	753313,6	9824504	102 -178	4	6	24
SP -19	753420,1	9824674	102 -178	4	6	24
SP -20	753526,6	9824843	102 -178	4	6	24
SP -21	753332,9	9824183	102 -178	4	6	24
SP -23	753539,8	9825256	102 -178	4	6	24
SP -24	753643,3	9824696	102 -178	4	6	24
PM-10	753017	9824858	102 -178	4	6	24
PM-*01	752685,4	9824926	102 -178	4	6	24
PM-*03	752780,9	9824939	102 -178	4	6	24
PM-02	752956,2	9824727	102 -178	4	6	24
PM-04	753013,5	9824778	102 -178	4	6	24
PM-07	752793,3	9824800	102 -178	4	6	24
PM-08	752861,8	9824975	102 -178	4	6	24
PM-09	752965,2	9824925	102 -178	4	6	24

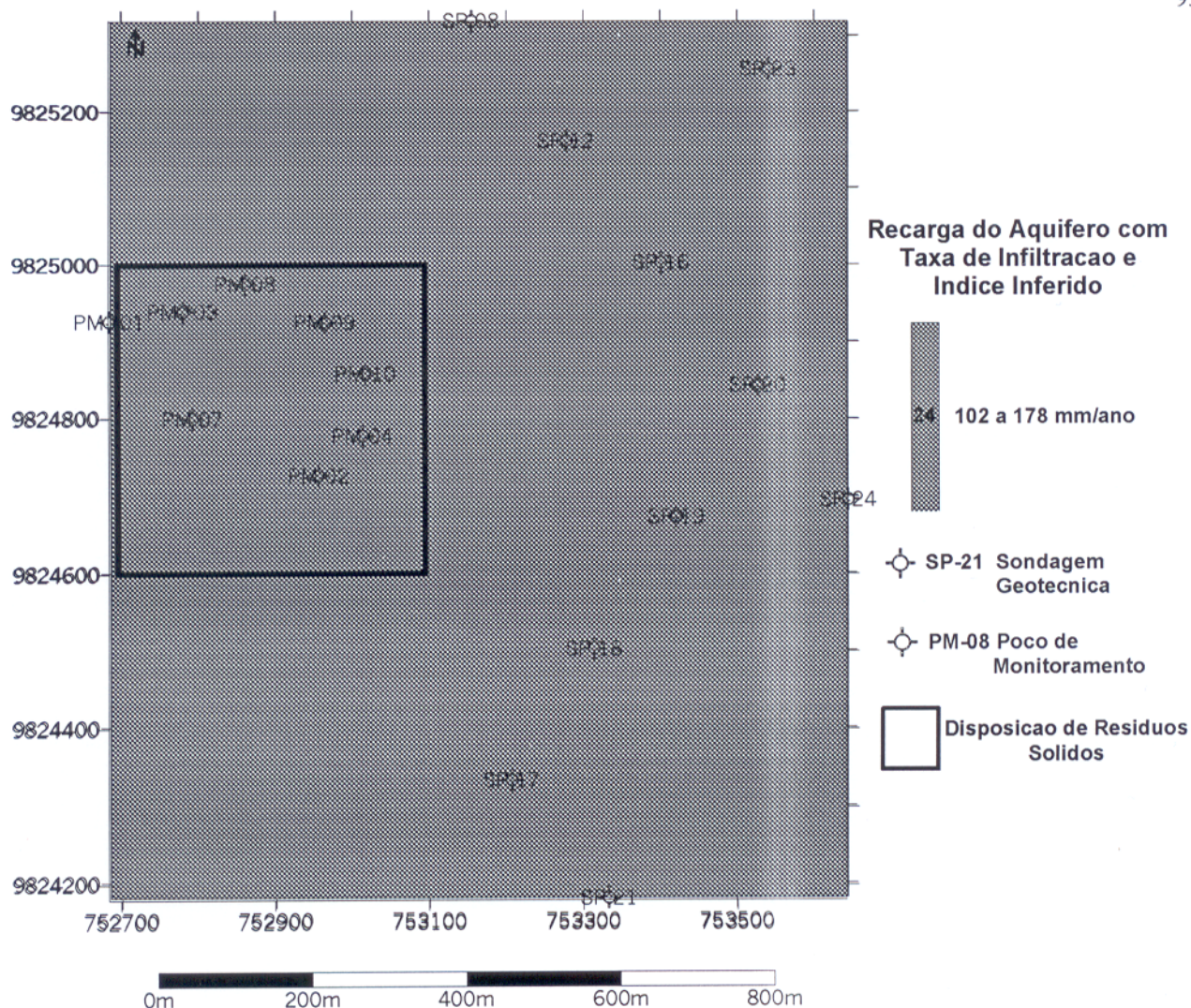


Figura 20- Recarga (Índice R) obtida para a área de disposição de resíduos sólidos.

Os tipos de sedimentos que compõem o aquífero (Índice A), foram classificados através das análises granulométricas realizadas no material coletado nos furos a trado manual. Uma vez que estes são compostos predominantemente por areias finas a muito finas com cascalho esparso e por areias finas siltosas, atribuiu-se para esses materiais índices 24 e 21, respectivamente (Figura 21). Vale ressaltar que na parte leste da ADRS não foram realizados furos a trado, sendo a caracterização litológica dessa zona baseada nos perfis das sondagens geotécnicas. Uma vez que foi possível identificar litotipos diferentes para os sedimentos que compõem a zona saturada do aquífero, mais uma vez a aplicação de métodos de mapeamento da vulnerabilidade em

micro-escala demonstrou sensibilidade aceitável, viabilizando do ponto de vista técnico sua aplicação.

Tabela 30- Valores obtidos para o meio aquífero com os respectivos valores do peso (Ap) e dos valores atribuídos (Ac) com o índice do aquífero (Ap x Ac).

Sondagem	Coordenadas		Litotipo	Peso (Ap)	Valor Atribuído (Ac)	Índice do Aquífero
	Leste	Norte				
SP -08	753155,3	9825319	Areia e cascalho	3	8	24
SP -12	753278	9825161	Areia e cascalho	3	8	24
SP -16	753400,9	9825003	Areia e cascalho	3	8	24
SP -17	753207,1	9824335	Areia e cascalho	3	8	24
SP -18	753313,6	9824504	Areia e cascalho	3	8	24
SP -19	753420,1	9824674	Areia e cascalho	3	8	24
SP -20	753526,6	9824843	Areia e cascalho	3	8	24
SP -21	753332,9	9824183	Areia e cascalho	3	8	24
SP -23	753539,8	9825256	Areia e cascalho	3	8	24
SP -24	753643,3	9824696	Areia e cascalho	3	8	24
PM-10	753017	9824858	Areia e cascalho	3	8	24
PM-*01	752685,4	9824926	Areia e cascalho	3	7	21
PM-*03	752780,9	9824939	Areia e cascalho	3	7	21
PM-02	752956,2	9824727	Areia e cascalho	3	7	21
PM-04	753013,5	9824778	Areia e cascalho	3	7	21
PM-07	752793,3	9824800	Areia e cascalho	3	7	21
PM-08	752861,8	9824975	Areia e cascalho	3	7	21
PM-09	752965,2	9824925	Areia e cascalho	3	7	21

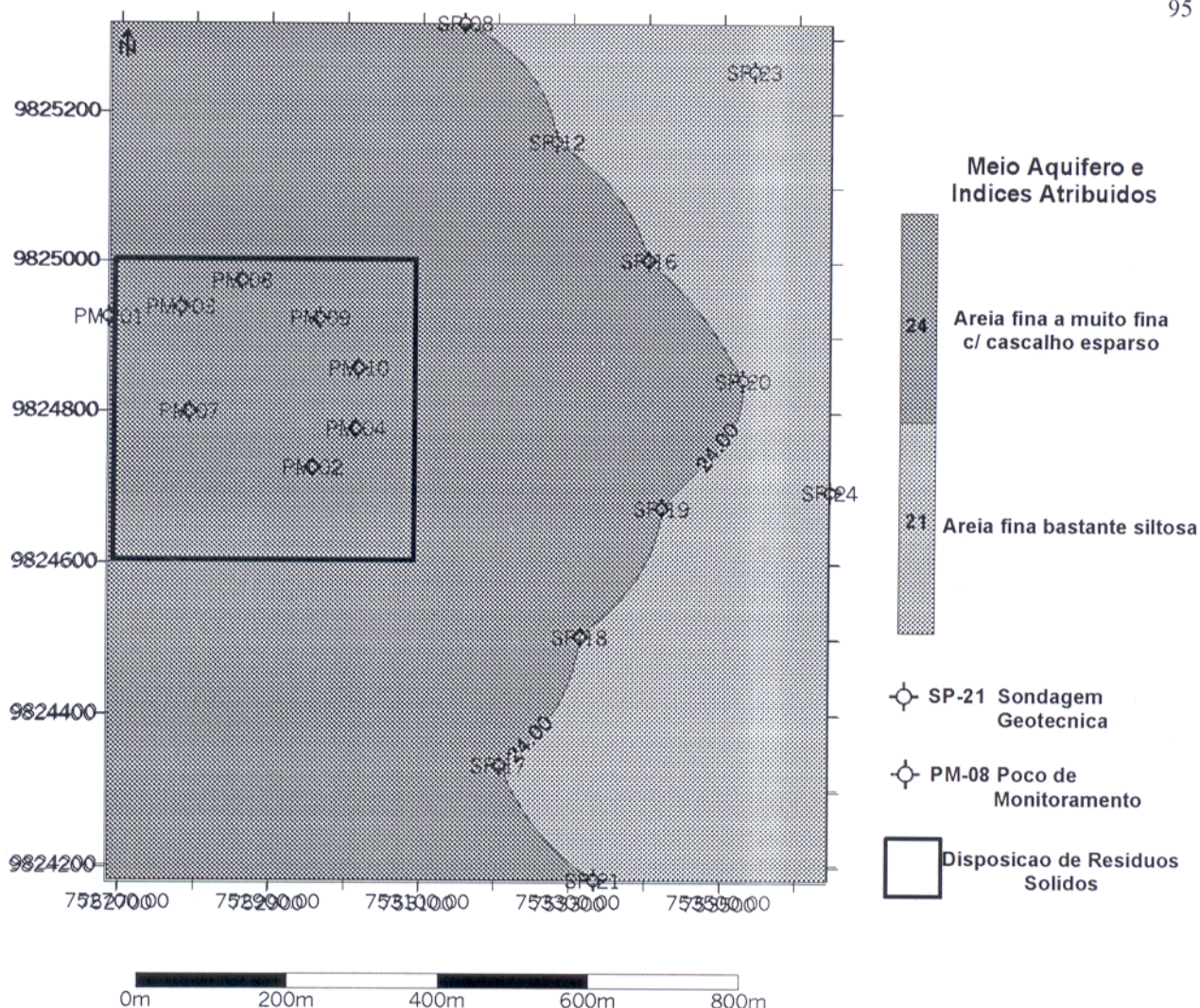


Figura 21- Meio aquífero (Índice A) identificado e seus respectivos índices na área de disposição de resíduos sólidos.

A topografia (Índice T) da área foi avaliada através de um mapa topográfico, através do qual observou-se que nas proximidades dos valos de deposição de resíduos sólidos as cotas encontram-se entre 16 e 18 metros de altitude em direção a norte, enquanto que em suas adjacências as cotas variaram entre 8 a 18 metros acima do nível do mar, sempre aumentando nesse sentido. Através destes valores foram obtidos gradientes entre 0% a 1,5% que, segundo a metodologia adotada, corresponde a uma Carga (T_c) de valores 9 e 10 (tabela 10). Através da multiplicação entre os fatores T_p e T_c , foi obtido o índice da topografia (Figura 22), cujos valores obtidos foram 9 e 10

(Tabela 31). Devido às pequenas proporções da área estudada e desta encontrar-se relativamente plana, o índice T apresentou pouca influência na determinação do índice final de vulnerabilidade da área, já que este apresentou uma variação de apenas 1,5% em toda sua extensão.

Tabela 31- Valores obtidos para a topografia com os respectivos valores do peso (Tp) e dos valores atribuídos (Tc) com o índice da topografia (Tp x Tc).

Sondagem	Coordenadas		Cota (m)	Inclinação do Relevo (%)	Peso (Tp)	Valor Atribuído (Tc)	Índice da Topografia
	Leste	Norte					
SP -08	753155,3	9825319	13,35	0,7	1	10	10
SP -12	753278	9825161	16,6	0,2	1	10	10
SP -16	753400,9	9825003	16,54	0,2	1	10	10
SP -17	753207,1	9824335	12,45	0,9	1	10	10
SP -18	753313,6	9824504	11,51	1,1	1	9	9
SP -19	753420,1	9824674	12,63	0,8	1	10	10
SP -20	753526,6	9824843	14,23	0,5	1	10	10
SP -21	753332,9	9824183	14,25	0,4	1	10	10
SP -23	753539,8	9825256	8,39	1,2	1	9	9
SP -24	753643,3	9824696	11,31	0,8	1	10	10
PM-10	753017	9824858	17,0	0,3	1	10	10
PM-*01	752685,4	9824926	15,5	1,5	1	9	9
PM-*03	752780,9	9824939	16,7	1,2	1	9	9
PM-02	752956,2	9824727	17,5	0,3	1	10	10
PM-04	753013,5	9824778	17,2	0,4	1	10	9
PM-07	752793,3	9824800	18,0	0,0	1	10	10
PM-08	752861,8	9824975	16,1	1,0	1	10	10
PM-09	752965,2	9824925	17,05	0,4	1	10	10

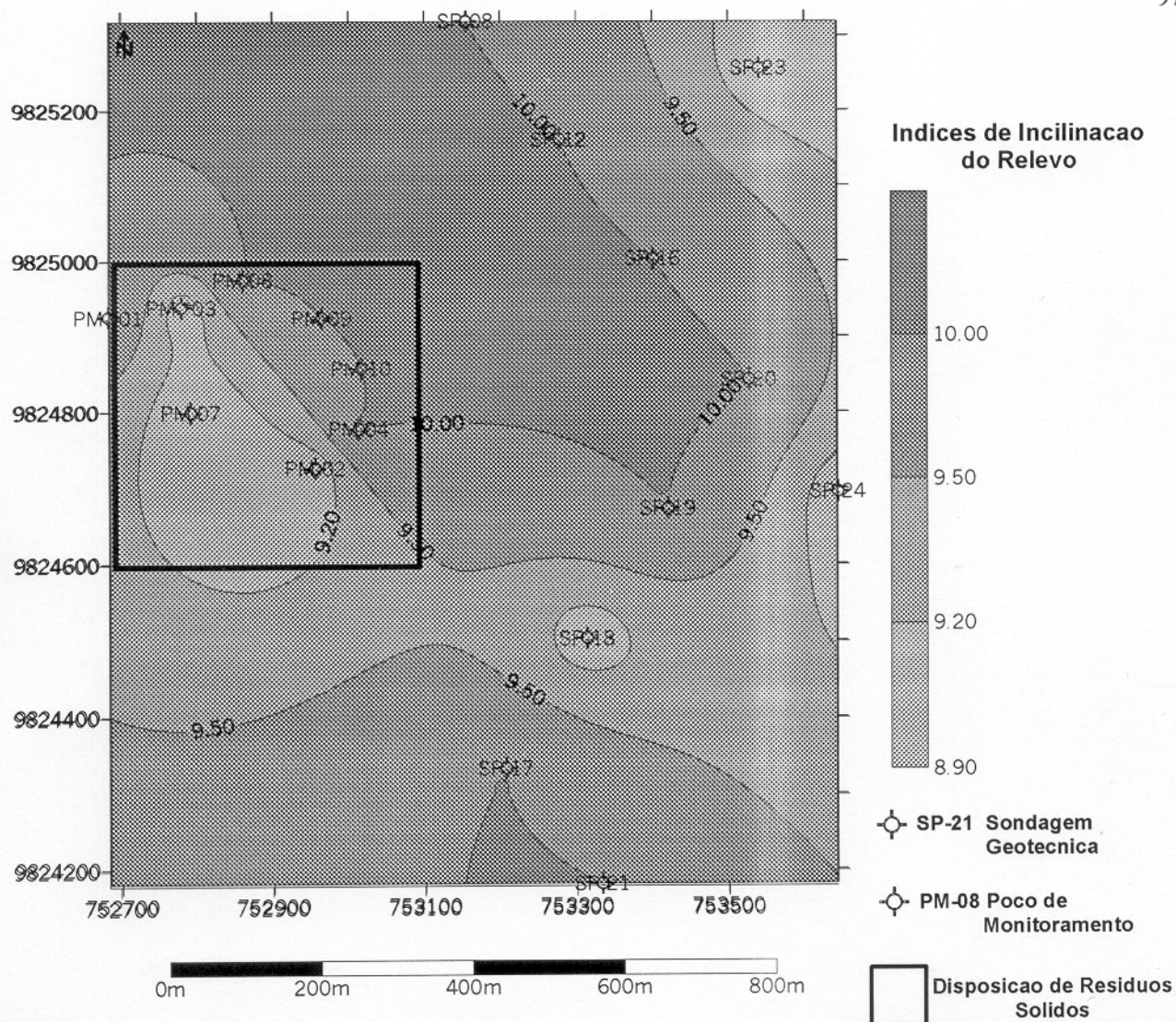


Figura 22- Gradientes topográficos (Índice T) identificados na área de disposição de resíduos sólidos.

Os sedimentos que constituem a zona não saturada (Índice I), foram identificados e classificados da mesma forma que o índice A. Esses sedimentos são formados por areia fina silto-argilosa e areia fina siltosa, para os quais foram obtidos os pesos 30 e 40, respectivamente (Figura 23). Como este parâmetro representa o índice "O" do método GOD (Foster & Hirata 1993), tendo sido estes identificados e classificados da mesma forma, a aplicação do modelo mais uma vez mostrou-se válida já que tornou-se possível distinguir essa diferença de litotipos mesmo em escala tão

Tabela 32- Valores obtidos para a zona vadosa com seus respectivos valores do peso (lp) e dos valores atribuídos (lc) com o índice de impacto da zona vadosa (lp x lc).

Sondagem	Coordenadas		Litotipo	Peso (Ap)	Valor Atribuído (Ac)	Impacto da Zona Vadosa
	Leste	Norte				
SP -08	753155,3	9825319	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -12	753278	9825161	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -16	753400,9	9825003	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -17	753207,1	9824335	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -18	753313,6	9824504	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -19	753420,1	9824674	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -20	753526,6	9824843	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -21	753332,9	9824183	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -23	753539,8	9825256	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
SP -24	753643,3	9824696	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
PM-10	753017	9824858	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	8	40
PM-*01	752685,4	9824926	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-*03	752780,9	9824939	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-02	752956,2	9824727	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-04	753013,5	9824778	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-07	752793,3	9824800	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-08	752861,8	9824975	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30
PM-09	752965,2	9824925	Areia e cascalho c/ silte e argila	5	6	30

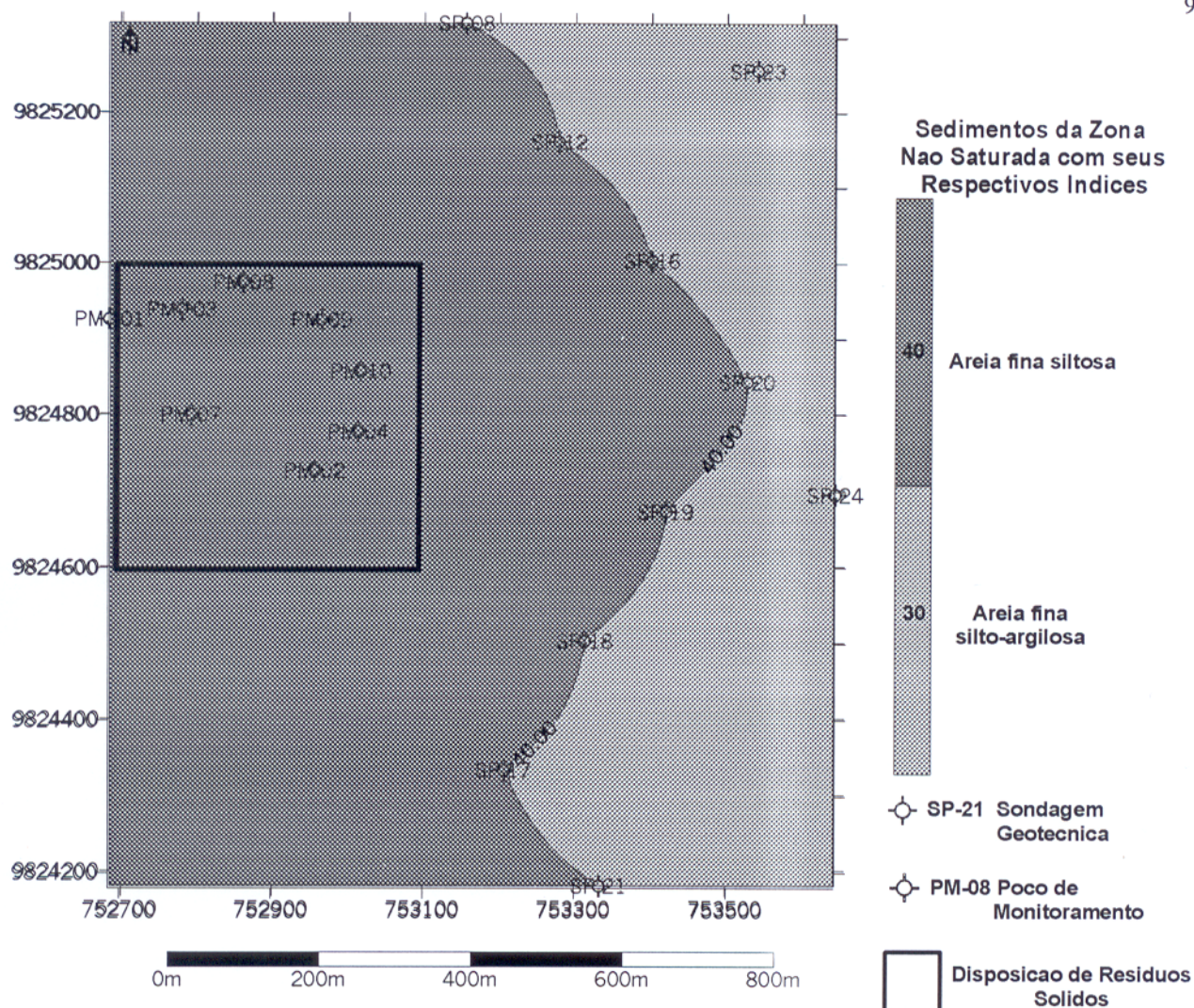


Figura 23- Sedimentos que constituem a zona não saturada (Índice I) na área de disposição de resíduos sólidos.

Uma vez que os valores da condutividade hidráulica obtidos através do ensaio de bombeamento (item 4.1.1) e do teste de infiltração (item 4.1.2) se mostraram significativamente diferentes, optou-se por adotar aquele obtido para a zona não saturada, entre 0,1028 m/dia a 0,2332 m/dia. Portanto, através do modelo proposto por Aller *et al.* (1987), foi inferido um único valor para o parâmetro C, uma vez que, na área, a litologia que compõe a zona não saturada é bastante homogênea. Assim, de acordo com metodologia adotada, a condutividade hidráulica dessa zona encontra-se dentro do intervalo de 0 a 4,1 m/dia, para o qual, foi atribuído o peso 3, como pode observar-se na tabela 33. Assim, o mapa representando a distribuição do índice C na ADRS apresenta

tonalidade única (Figura 24). Da mesma forma que a recarga (Índice R), não foi possível identificar mais de um valor para a condutividade hidráulica devido à grande homogeneidade dos sedimentos constituintes da zona vadosa. Logo, esses dois parâmetros foram os que apresentaram menor significado na obtenção do índice final de vulnerabilidade DRASTIC (Aller *et al.* 1987). No entanto, a utilização de ambos se fez válida, pois é necessário comparar estes valores com aqueles obtidos em áreas com as mesmas características hidrogeológicas a fim de obter um *ranking* daquelas com maior vulnerabilidade à contaminação. Portanto, os parâmetros R e C não tivessem sido utilizados essa comparação não seria possível.

Tabela 33- Valores obtidos para a condutividade hidráulica com seus respectivos valores do peso (Cp) e dos valores atribuídos (Cc) com o índice de Condutividade Hidráulica (Cp x Cc).

Sondagem	Coordenadas		Condutividade Hidráulica (m/dia)	Peso (Cp)	Valor Atribuído (Cc)	Índice da Condutividade Hidráulica
	Leste	Norte				
SP -08	753155,3	9825319	0 – 4,1	3	1	3
SP -12	753278	9825161	0 – 4,1	3	1	3
SP -16	753400,9	9825003	0 – 4,1	3	1	3
SP -17	753207,1	9824335	0 – 4,1	3	1	3
SP -18	753313,6	9824504	0 – 4,1	3	1	3
SP -19	753420,1	9824674	0 – 4,1	3	1	3
SP -20	753526,6	9824843	0 – 4,1	3	1	3
SP -21	753332,9	9824183	0 – 4,1	3	1	3
SP -23	753539,8	9825256	0 – 4,1	3	1	3
SP -24	753643,3	9824696	0 – 4,1	3	1	3
PM-10	753017	9824858	0 – 4,1	3	1	3
PM-*01	752685,4	9824926	0 – 4,1	3	1	3
PM-*03	752780,9	9824939	0 – 4,1	3	1	3
PM-02	752956,2	9824727	0 – 4,1	3	1	3
PM-04	753013,5	9824778	0 – 4,1	3	1	3
PM-07	752793,3	9824800	0 – 4,1	3	1	3

PM-08	752861,8	9824975	0 – 4,1	3	1	3
PM-09	752965,2	9824925	0 – 4,1	3	1	3

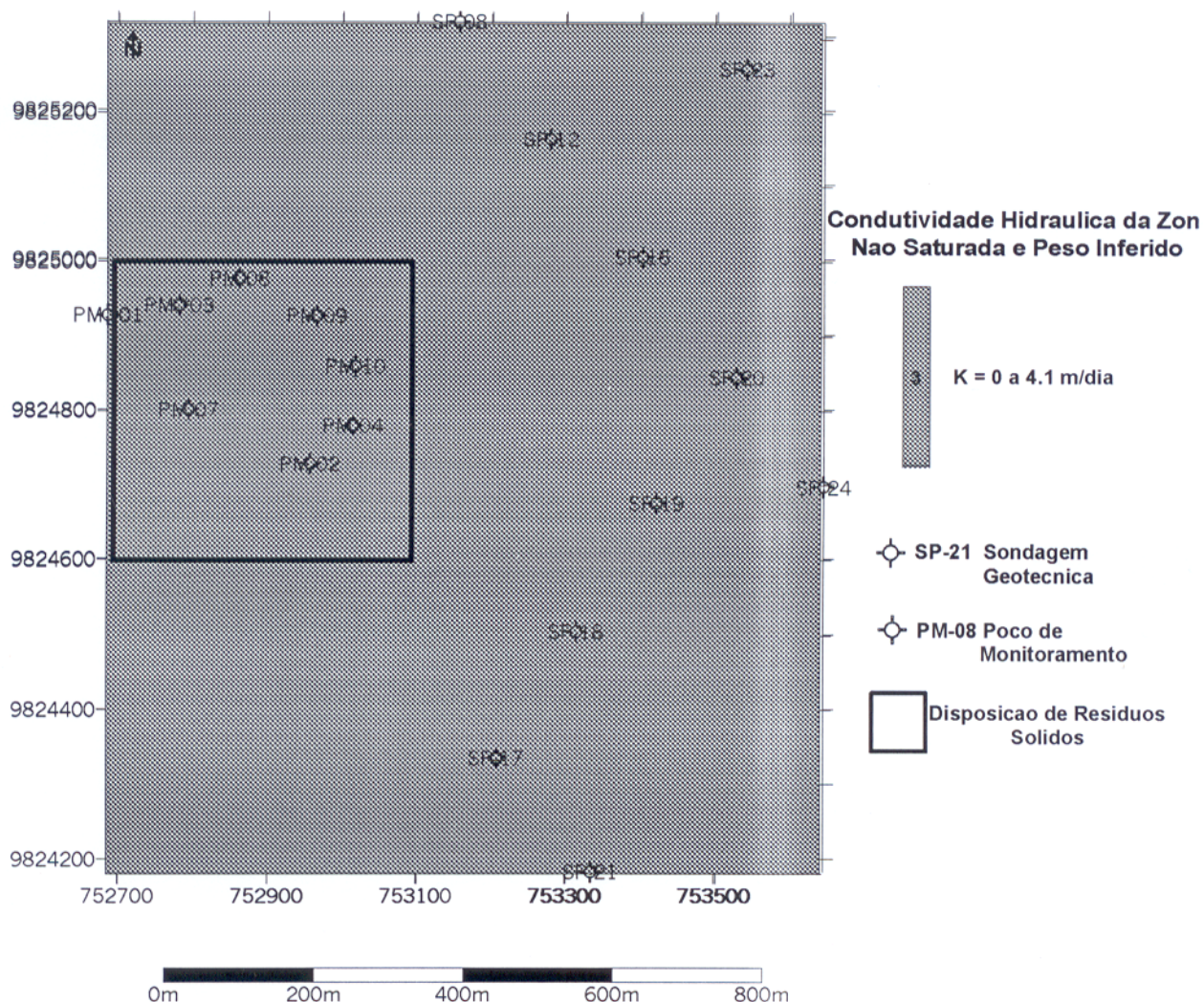


Figura 24- Valor obtido para a condutividade hidráulica (Índice C) e seu peso inferido, na área de disposição de resíduos sólidos.

Finalmente, através da soma entre os índices atribuídos a todos os fatores, foi obtido o índice final DRASTIC para a área investigada cujos valores alcançados foram 128, 133, 136, 138, 146 e 151 (Tabela 34) para a vulnerabilidade do aquífero livre (Figura 25). Cabe-se ressaltar que o modelo DRASTIC fornece somente valores finais para a vulnerabilidade, denominados Índices DRASTIC, tornando-se necessário

comparar esses valores àqueles obtidos em diferentes áreas com as mesmas características e analisada através do mesmo modelo, a fim de identificar a região mais vulnerável. Por outro lado, o método GOD, através da multiplicação entre seus três índices, nos fornece uma análise tanto quantitativa, através do resultado da multiplicação, como qualitativa, pois estes valores apresentam conceitos que vão desde negligenciável a muito alto, de modo que, não se faz necessário a sua comparação com outras áreas distintas. Logo, a comparação entre os dois modelos não seria possível por ambos utilizarem alguns parâmetros distintos e os valores finais serem interpretados de maneiras diferentes.

Tabela 34- Parâmetros utilizados para determinar a vulnerabilidade do aquífero e seus índices finais DRASTIC.

Sondagem	Coordenadas		Índices	Índices	Índices	Índices	Índices	Índices	Índices
	Leste	Norte	D	R	A	T	I	C	Finais DRASTIC
SP -08	753155,3	9825319	45	24	24	10	40	3	146
SP -12	753278	9825161	50	24	24	10	40	3	151
SP -16	753400,9	9825003	35	24	24	10	40	3	136
SP -17	753207,1	9824335	45	24	24	10	40	3	146
SP -18	753313,6	9824504	35	24	24	9	40	3	136
SP -19	753420,1	9824674	45	24	24	10	40	3	146
SP -20	753526,6	9824843	45	24	24	10	40	3	146
SP -21	753332,9	9824183	45	24	24	10	40	3	146
SP -23	753539,8	9825256	35	24	24	9	40	3	136
SP -24	753643,3	9824696	45	24	24	10	40	3	146
PM-10	753017	9824858	45	24	24	10	40	3	146
PM-*01	752685,4	9824926	40	24	21	9	30	3	128
PM-*03	752780,9	9824939	45	24	21	9	30	3	133
PM-02	752956,2	9824727	45	24	21	10	30	3	133
PM-04	753013,5	9824778	45	24	21	9	30	3	133
PM-07	752793,3	9824800	45	24	21	10	30	3	133
PM-08	752861,8	9824975	45	24	21	10	30	3	133

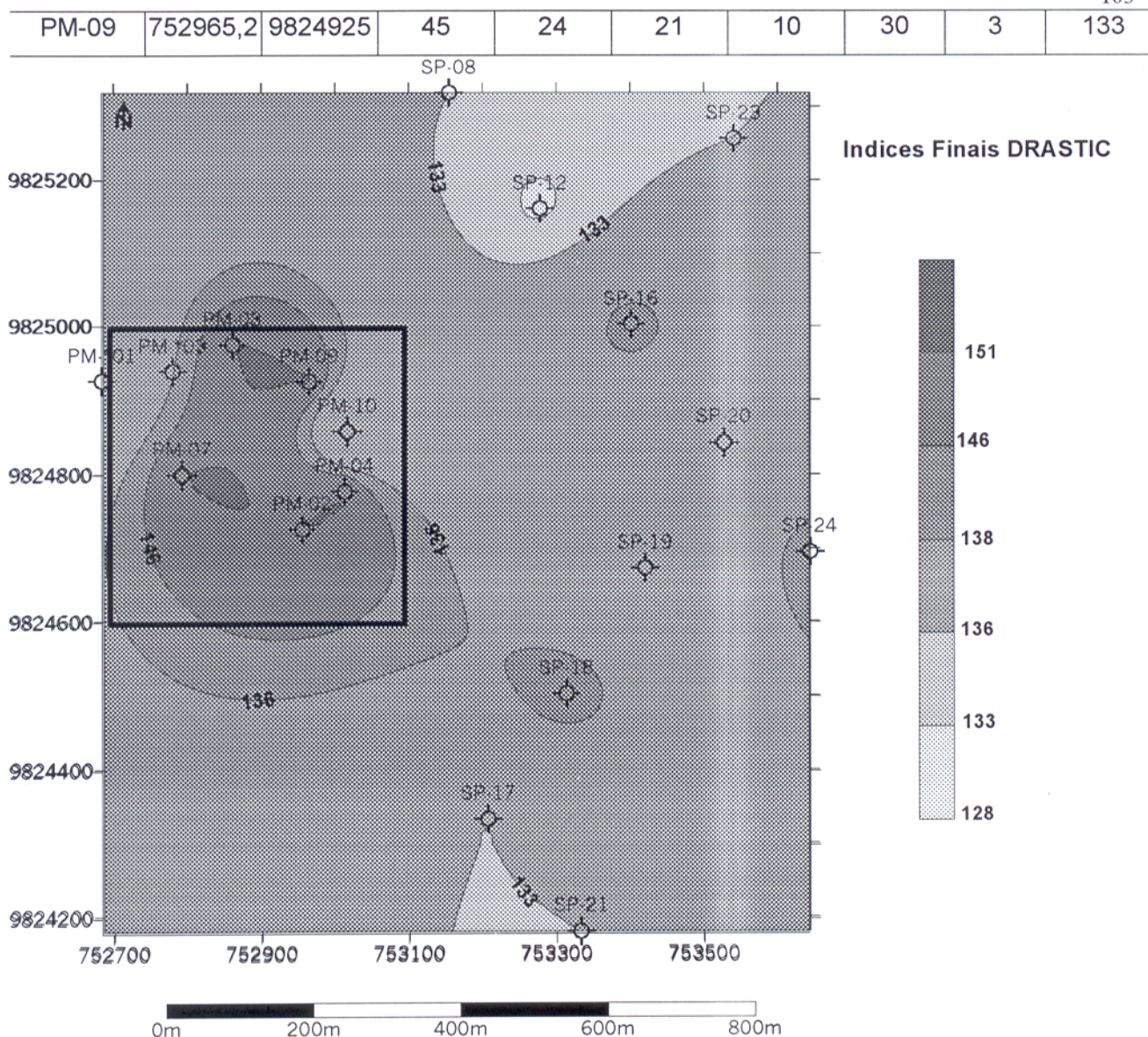


Figura 25- Vulnerabilidade natural do aquífero livre com os índices finais DRASTIC e seus respectivos valores na área de disposição de resíduos sólidos.

4.3- CORRELAÇÃO ENTRE AMBIENTES GEOLÓGICOS NA APLICAÇÃO DO MODELO DRASTIC

Na obtenção do índice final DRASTIC (Aller *et al.* 1987), são atingidos diversos valores de vulnerabilidade que, quando relacionados entre si, irão apontar as partes mais vulneráveis na área considerada. No entanto, diferentemente do método GOD (Foster & Hirata 1993), não são inferidos conceitos de maior ou menor valor para a vulnerabilidade do aquífero. Assim sendo, no modelo DRASTIC se faz necessário a

comparação com outros ambientes hidrogeológicos semelhantes àquele em que se está trabalhando. Dessa forma, é possível determinar se os valores de vulnerabilidade obtidos são baixos ou elevados.

Para fazer esse tipo de comparação, foi utilizado nessa dissertação a região dos *High Plains*, localizada na parte centro-sul dos Estados Unidos, onde Aller *et al.* (1987) aplicaram o modelo DRASTIC, durante o desenvolvimento do método.

Os autores do método descreveram o Aquífero *High Plains* como depósitos aluviais espessos posicionados sobre rochas sedimentares bastante fraturadas. Essa região ocupa uma área de cerca de 450.000 km², sendo seus sedimentos remanescentes de uma grande planície aluvial miocênica, constituindo um dos mais produtivos e desenvolvidos aquíferos dos Estados Unidos. O material aluvial derivado das Montanhas Rochosas, conhecido por Formação Ogallala, apresenta espessuras pequenas a mais de duzentos metros, consistindo basicamente em argila, silte, areia e cascalhos, mal selecionados, geralmente inconsolidados. De acordo com os autores, esse material apresenta alta vulnerabilidade como pode ser observado no item 2.2 da presente dissertação.

Na área estudada por Aller *et al.* (1987) a recarga é muito baixa e o solo é predominantemente argiloso. Por sua vez, na região da Formação Ogallala, a condutividade hidráulica é maior nos sedimentos que constituem essa unidade que nos Sedimentos Pós-Barreiras.

Na avaliação citada, os autores utilizaram todos os parâmetros descritos no método e, no final, com a soma de todos os pesos, foi atingido o valor de 109 para o índice final de vulnerabilidade, considerado alto para os autores, devido ao ambiente geológico que compõe os sedimentos daquela formação.

Os valores atribuídos para cada parâmetro da Formação Ogallala estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35- Parâmetros utilizados com os respectivos valores do Índice DRATIC na Formação Ogallala.

PARÂMETRO	ABRANGÊNCIA	PESO	CARGA	Nº FINAL
D	75-100 pés	5	2	10
R	0-2 polegadas	4	1	4
A	Areia e cascalho	3	8	24
S	Argila	2	7	14
T	2-6%	1	9	9
I	Silte e argila	5	6	30
C	700-1000	3	6	18
Índice DRASTIC = 109				

De uma maneira geral, apesar de terem sido empregados todos os fatores do modelo DRASTIC para esse ambiente hidrogeológico dos Estados Unidos, o valor da vulnerabilidade final obtido foi inferior ao identificado para a área de disposição de resíduos sólidos na ALBRAS, o que comprova o seu alto índice de vulnerabilidade natural à contaminação, sem considerar ainda, a escala de trabalho, que na Formação Ogallala abrange uma área de cerca de 450.000 km², enquanto que na ADRS a extensão é pouco superior a 5 km².

4.4- COMPARAÇÃO ENTRE OS MODELOS GOD E DRASTIC

Os principais motivos para serem utilizados na presente dissertação, tanto o método GOD como o modelo DRASTIC, para determinar a vulnerabilidade natural do aquífero livre, foram:

- a) a pouca utilização do modelo DRASTIC em nosso país, destacando-se o de Leite & Möbus (1998), no litoral oeste do Estado do Ceará, na bacia hidrográfica do rio Mundaú, onde foram ajustadas algumas modificações nos parâmetros utilizados, de acordo com a realidade local;
- b) verificar a viabilidade de aplicação desses métodos, considerando-se a carência de recursos financeiros e a dificuldade na obtenção dos dados necessários, freqüentes na maioria dos trabalhos realizados em nosso país;
- c) realizar uma comparação entre os dois métodos, a fim de identificar o mais apropriado para ser aplicado em escala de detalhe, como naquela onde são dispostos os resíduos sólidos da ALBRAS.

De um modo geral, há uma grande dificuldade para se obter dados hidrogeológicos, até mesmo mapas topográficos em escala mais detalhada. No que diz respeito a parâmetros como condutividade hidráulica, granulometria dos sedimentos, profundidade do nível estático, dentre outros, a situação é ainda mais crítica, sendo somente encontrados em artigos, teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso, ainda em número bastante reduzido e restritos a poucas áreas.

Tendo em vista as dificuldades acima mencionadas, a realização dessa dissertação só se tornou viável devido ao apoio técnico e financeiro da ALBRAS, que forneceu perfis de poços e de sondagens geotécnicas, além de financiar a execução de furos a trado manual, para um melhor conhecimento da hidrogeologia local, demonstrando que a parceria entre a iniciativa privada e a universidade deve ser valorizada cada vez mais.

O convênio auxiliou à empresa na escolha dos locais para a construção de novos valos de disposição de resíduos sólidos e no melhor entendimento da área de suas instalações; possibilitando ainda a realização da presente dissertação de mestrado, em uma área de conhecimento ainda em desenvolvimento em nossa região.

Com base no exposto constata-se que se torna muito mais difícil determinar a vulnerabilidade de um aquífero com maior acuracidade, se o método aplicado empregar um número muito elevado de parâmetros. Dessa forma, considera-se que o método GOD (Foster & Hirata 1993) apresenta-se como o mais viável; uma vez que parâmetros como a profundidade do nível estático, o litotipo da zona não saturada e o tipo de aquífero podem ser facilmente identificados através de furos a trado manual e poços de monitoramento. Por outro lado, fatores como a condutividade hidráulica, a recarga, a topografia, dentre outros, requerem estudos mais detalhados; o que dificulta a aplicação do modelo DRASTIC.

O próprio fato do modelo DRASTIC utilizar um maior número de fatores também prejudica a aplicação do método em regiões pouco extensas, como na área de disposição de resíduos sólidos, com pouco mais de 5 km²; apesar do método ter sido desenvolvido para áreas com extensão a partir de 0,4 km². Esse problema se deu em razão da homogeneidade da área, uma vez que fatores como a recarga, a condutividade hidráulica e os litotipos das zonas saturada e não saturada serem

praticamente os mesmos, ou com ínfimas variações, em toda a área de estudo. No entanto, essa limitação não ficou restrita ao DRASTIC, pois observou-se o mesmo no modelo GOD. Neste último, porém, devido a um menor número de parâmetros utilizados houve uma maior variação nos índices, sendo a profundidade do nível estático o de maior destaque.

Além do mais, observou-se que o método DRASTIC utiliza a soma de seus parâmetros a fim de obter o índice final de vulnerabilidade, sendo necessário comparar-se esses valores com aqueles de áreas geologicamente semelhantes a fim de identificar a que apresenta maior vulnerabilidade natural à contaminação. O método GOD, por sua vez, multiplica os valores de seus três índices a fim de obter os valores finais de vulnerabilidade para uma determinada área, apresentando uma análise quantitativa e qualitativa, uma vez que são aplicados conceitos para os valores identificados, o que facilita a interpretação dos mapas gerados, onde pode-se visualizar as áreas com maiores e menores valores de vulnerabilidade. Por outro lado, no modelo DRASTIC, através da visualização apenas dos valores dificulta o entendimento dos mesmos, principalmente para leigos como políticos e planejadores que devem utilizá-los em importantes tomadas de decisões.

Vale destacar que nos mais diversos métodos de determinação da vulnerabilidade natural de aquíferos, tanto livres como confinados, não são considerados fatores como volume e persistência da carga contaminante, uma vez que estes métodos avaliam a vulnerabilidade intrínseca do meio, ou seja, a proteção natural apresentada pelo sistema hidrogeológico. No entanto, em definições de vulnerabilidade como a de Lobo Ferreira & Cabral *apud* Stigter & Dill (2000), está implícita a noção de “carga contaminante imposta”, que na prática não é contemplada por nenhum modelo. Porém, esse fato foi observado por Stigter & Dill (2000) em duas regiões de Portugal, sujeitas à prática agrícola intensa, a Campina do Faro e a Campina da Luz, onde, durante três anos, foram realizados estudos hidrogeológicos detalhados a fim de entender os processos geoquímicos responsáveis pela contaminação por nitrato nas duas regiões.

Segundo os autores, na região da Campina do Faro, onde o aquífero superior é composto por areias moderadamente permeáveis, cobertas por camadas holocênicas

de silte e argila com até 10 metros de espessura, as concentrações de Cl e NO₃ chegam a atingir 530 mg/L e 560 mg/L, respectivamente; enquanto que, na região da Campina da Luz, formada principalmente por calcários bastante carstificados, os teores de Cl e NO₃ encontram-se entre 180 mg/L e 120 mg/L, respectivamente. Logo, de acordo com o ambiente hidrogeológico, a Campina do Faro deveria apresentar teores de contaminantes bem abaixo da Campina da Luz, já que na primeira o aquífero encontra-se em condições praticamente confinantes. Para Stigter & Dill (2000), a grande discrepância entre a vulnerabilidade à contaminação calculada pelo modelo DRASTIC e o estado real da contaminação nas duas áreas estudadas está no fato do método ignorar fatores como o volume e a persistência dos contaminantes.

4.5- AVALIAÇÃO DOS RISCOS DE CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS

4.5.1- Avaliação de risco de contaminação na área de disposição

Na presente dissertação, a avaliação dos riscos de contaminação na área estudada fundamentou-se na metodologia utilizada por Hassuda (1997), na Região Metropolitana de São Paulo, aplicável principalmente para a avaliação dos riscos ambientais, associados com atividades industriais e em áreas de lixões. Trata-se de uma metodologia que visa otimizar o gerenciamento de áreas potencialmente contaminadas, suspeitas de contaminação ou comprovadamente contaminadas, indicando a necessidade de medidas de prevenção, contenção e/ou remediação destas.

O sistema de avaliação adotado, associa as características do meio físico, as formas de ocupação da área de entorno da fonte de contaminação, o tipo e o volume de resíduos considerados, entre vários outros fatores. Trata-se, portanto, de um sistema de avaliação de risco no qual estão implícitos tanto a vulnerabilidade natural do aquífero como as características da carga contaminante. Cabe destacar que, atualmente, as avaliações de risco tendem a priorizar a caracterização dos efeitos adversos do contaminante sobre a saúde pública e sobre o meio ambiente (Kolesnikovas 1998; Capeleti *et al.* 1998).

Essa metodologia fundamenta-se na proteção da qualidade dos recursos ambientais (água superficial, água subterrânea, solo e ar) e da saúde pública, em áreas

de manejo de substâncias poluentes, sendo consideradas áreas potenciais (AP's), áreas suspeitas (AS's) e áreas contaminadas (AC's).

De acordo com a metodologia adotada, o conceito de bens a proteger trata de seis elementos especificamente, que são, saúde e vida da população (BP1), abastecimento público (BP2), uso do solo (BP3), proteção das águas subterrâneas e superficiais (BP4) uso agrícola e pecuária (BP5) e outros bens a proteger (BP6). No presente trabalho, foram considerados para fins de pontuação apenas BP1, BP4 e BP6. O BP2 não foi pontuado já que a água subterrânea não é utilizada para abastecimento público. Por sua vez, os bens BP3 e BP5 não foram considerados devido ao fato do solo da área não ser utilizado para fins agrícolas ou pecuários.

A pontuação das componentes Ra, Rb e Rc teve como base os dados da ficha cadastral, apresentada no Anexo 1.

4.5.2- Fatores de risco

Periculosidade do Local de Disposição (Fator Ra)

O fator de risco Ra corresponde à periculosidade do local de disposição dos resíduos, sendo composto pelos índices Ra1 (Tipo de disposição e volume) e Ra2 (Grupo de substâncias), como descritos nas Tabelas 13 e 14, no capítulo 3, enquanto que, os valores adotados na área estudada encontram-se nas Tabelas 36 e 37.

Nessa análise foi considerada a forma como foram construídos os valos de disposição de resíduos, uma vez que durante sua instalação foram seguidas todas as normas técnicas vigentes para a implantação de aterros industriais, conforme descrito por Rocca *et al.* (1994), sendo estas:

NBR 10.004 – Resíduos Sólidos – Classificação

PNI 603.06.006 – Aterros de Resíduos não Perigosos. Critérios para Projeto, Construção e Operação.

PNI 63.06-003 – Construção de Poços de Monitoramento e Amostragem de Aquífero freático.

CETESB L 1030 – Membranas Impermeabilizantes e Resíduos – Determinação de Compatibilidade.

A figura 26 exemplifica o tipo de aterro industrial implantado na ADRS.

Para o tipo de material disposto na ADRS, foi considerado o resíduo industrial depositado nos valos cujo volume foi fornecido pela empresa, perfazendo um total de 72.287 m³ até agosto do ano 2000.

Dentre o grupo de substâncias depositadas no local há uma quantidade muito variada de acordo com os dados fornecidos pela empresa. Dentre estes, destacam-se os compostos fluorados. Nesse caso, apenas estes foram considerados, uma vez que a sua presença nos resíduos já implica na pontuação máxima, pois o sistema de pontuação é eliminatório, levando em consideração somente a pior situação, ou de maior risco.

Tabela 36- Valores de Rn e Mn para o componente Ra1 utilizados na ADRS.
Valores de Rn e Mn para o Componente Ra1 (Tipo de Resíduo)

TIPOS DE RESÍDUOS	Confirmado	Estimado	BP1 a BP6	Mn	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6
Resíduo Industrial	3				3			3		3
Resíduo de Serviço de Saúde										
Resíduo Domiciliar										
Resíduo de Mineração										
Resíduo Inerte										
Varricão										
Entulhos										
Lodo do Tratamento de Águas Residuais										
Outros Lodos										
Lodo de Dragagem										
			3	X1,9	5,7			5,7		5,7
Volume de resíduos										
>1.000.000 m ³										
100.000 – 1.000.000 m ³										
<100.000 m ³	1		1							
			1	X0,48	0,48			0,48		0,48

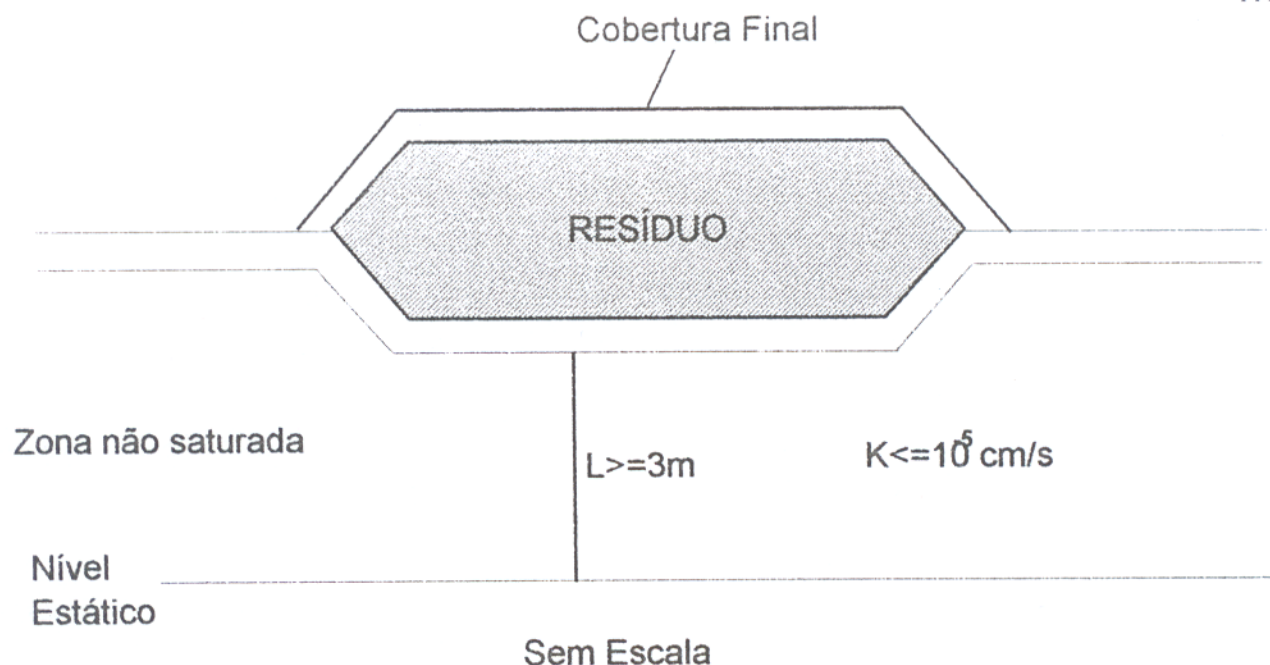


Figura 26- Esquema da aterro de resíduos Classe I – Condições climáticas e hidrogeológicas favoráveis (Rocca *et al.* 1994).

Tabela 37 - Valores de Rn e Mn para o componente Ra2 adotados na ADRS, e o valor total do componente Ra.

Valores de Rn e Mn para o Componente Ra2 (Grupo de Substâncias)			
GRUPOS DE SUBSTÂNCIAS	Confirmado	Estimado	BP1 a BP6
Orgânicos halogenados voláteis			
Orgânicos não halogenados voláteis			
Hidrocarbonetos clorados voláteis			
Aromáticos clorados (PCB)			
Dioxinas e Furanos			
Compostos orgânicos nitrogenados, fosfatados, sulfatados (sem pesticidas)			
Hidrocarbonetos aromáticos (sem PAH)			
Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (PAH)			
Fenóis			
Derivados de petróleo			
Alcatrões e produtos similares			
Pesticidas			
Metais e seus compostos			
Compostos inorgânicos (sem metais)			
Compostos inorgânicos (mais tóxicos: Cianetados, fluorados e cromados)	3		3

Aeroporto							
Área militar							
Comercial							
Industrial							
Área de interesse público							
Mineração							
Resid. c/ hortas (alta dens. pop.)							
Resid. c/ hortas (baixa dens. pop.)							
Resid. s/ hortas (alta dens. pop.)							
Resid. s/ hortas (baixa dens. pop.)							
Parque, área verde							
Parque/escola infantil							
Área de lazer e desportos							
Cemitérios							
Escola							
Hortas							
Área de pecuária							
Área agrícola							
Mata natural	1	1			1		1
Área de Proteção Ambiental							
Área de Proteção de Mananciais							
Bacia hidrográfica de abastecimento							
Aquíferos importantes							
Zona de maior restrição de proteção de mananciais							
Área inundável, várzea							
Represa de abastecimento público							
Água superficial de abastecimento público							

Área de Proteção de Mananciais																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																																	
--------------------------------	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

Pontuação Final

De acordo com a metodologia adotada, a pontuação final foi obtida através da multiplicação dos fatores Ra, Rb e Rc, atingindo o valor final de 108,25, como pode ser observado na tabela 41. Trata-se, portanto, de um valor abaixo do índice crítico de 200 estabelecido pela metodologia adotada.

Vale ressaltar que o valor obtido na pontuação final encontra-se não somente abaixo do valor crítico, como também dos valores observados por Hassuda (1997) em todos os lixões investigados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Através dessa diferença observada, pode-se concluir que a área de disposição de resíduos sólidos (ADRS) da ALBRAS apresenta baixos valores de risco de contaminação, uma vez que esta foi construída de acordo com as normas técnicas para construção de resíduos sólidos.

Tabela 41- Esquema de pontuação adotado para calcular o risco de contaminação, e os valores finais obtidos na ADRS.

PONTUAÇÃO FINAL						
	BP1	BP2	BP3	BP4	BP5	BP6
Fator Ra (Ra1 + Ra2) (Disposição de Resíduos)	9,03	-	-	9,03	-	9,03
X						
Fator Rb (Fator Rb2) (vias de propagação)	2,7	-	-	2,7	-	2,7
X						
Fator Rc (Rc1 + Rc2) (Bens a proteger)	4,44	-	-	4,44	-	4,44
=						
Pontuação Final	108,25	-	-	108,25	-	108,25

5- CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De acordo com os estudos realizados durante a presente dissertação, foi possível obter as seguintes conclusões:

Os sedimentos investigados na Área de Disposição dos Resíduos Sólidos (ADRS) são predominantemente arenosos, com porções areno-siltosas a areno-silto-argilosas, pertencentes aos Sedimentos Pós-Barreiras, os quais constituem o aquífero investigado.

A condutividade hidráulica da zona não saturada situa-se entre 0,10 m/dia a 0,23 m/dia. Para a zona saturada, obteve-se o valor de 1,88 m/dia para a condutividade hidráulica, 43,92 m²/dia para a transmissividade e 7,5 cm/dia para a velocidade do fluxo subterrâneo. A diferença entre os valores da condutividade hidráulica nas zonas saturada e não saturada se deve principalmente, a um aumento na granulometria dos sedimentos que compõem o aquífero, com a profundidade, passando estes de areia fina siltosa a areia média a grossa com cascalho. Através do valor obtido para a velocidade aparente do fluxo subterrâneo verificou-se que em caso de uma carga contaminante atingir o lençol freático esta somente alcançaria as drenagens mais próximas em cerca de 18 anos, sendo possível portanto, serem tomadas as medidas necessárias para a remediação do acidente.

Através do balanço hídrico obteve-se valores de evapotranspiração real de 115,33 mm/ano; enquanto que, a taxa de infiltração obtida foi de 115,58 mm/ano ou 47,84% da precipitação durante um ano hidrológico, o que implica em uma alta taxa de recarga para o aquífero em apreço, acarretando uma variação de cerca de 3 metros no nível estático entre os períodos seco e chuvoso.

O aquífero estudado foi classificado como sendo do tipo livre, com uma pequena área recoberta por lente argilosa pouco expressiva, onde o aquífero foi classificado como livre com cobertura. Essa lente argilosa apresenta pouca influência quanto à proteção natural do aquífero, pois esta atinge somente cerca de um terço da ADRS e menos de 10% da área investigada.

O índice de vulnerabilidade natural à contaminação do aquífero livre obtido através do método GOD (Foster & Hirata 1993) foi predominantemente alto. Através do Modelo DRASTIC (Aller *et al.* 1987) o índice mais elevado atingido foi de 151, sendo

este correlacionado a um sistema hidrogeológico muito semelhante, considerado de alta vulnerabilidade pelos mesmos autores, onde foi obtida a pontuação 109 no índice DRASTIC. Logo, a vulnerabilidade do aquífero na ADRS também pôde ser considerada alta, através do segundo modelo aplicado.

Em relação ao risco de contaminação, a área estudada apresentou pelo modelo adotado por Hassuda (1997) o valor de 108,25, bastante abaixo do índice crítico de 200, apontado pelo autor. Essa situação é resultante de uma combinação de diversos fatores, destacando-se a adequada disposição dos resíduos sólidos.

Mesmo aplicadas em uma pequena área as metodologias de mapeamento da vulnerabilidade natural do aquífero livre apresentaram sensibilidade suficiente para serem identificados valores diferenciados para alguns parâmetros. O método GOD (Foster & Hirata 1993) no entanto mostrou-se mais sensível para tal, uma vez que os três parâmetros apresentaram valores distintos para cada índice, enquanto que no modelo DRASTIC (Aller *et al.* 1987), elementos como a recarga e a condutividade hidráulica apresentaram somente um valor para toda a área investigada, devido à escala utilizada e à homogeneidade do litotipo local, respectivamente.

Dentre os parâmetros empregados para determinar a vulnerabilidade natural do aquífero, constatou-se a carência de dados hidrogeológicos como condutividade hidráulica, valores de nível estático, perfis litológicos e até mesmo mapas topográficos em escala de detalhe, sendo somente encontrados em artigos, teses e dissertações, ainda em número bastante reduzido e restritos a poucas áreas. Essa limitação apresentou-se como mais um fator limitante para a aplicação do modelo DRASTIC (Aller *et al.* 1987) devido ao maior número de parâmetros utilizados. Assim sendo, a parceria entre as instituições de pesquisa e a iniciativa privada é uma ótima alternativa para a implantação de projetos de pesquisa, principalmente em tempos de recursos escassos nas Universidades Públicas. Um exemplo desta parceria é o presente trabalho que só pôde ser desenvolvido graças à parceria com a ALBRAS, que além do apoio financeiro, disponibilizou de seu acervo perfis, mapas, dados de nível estático dentre vários outros dados, sem os quais a execução deste estaria inviabilizado.

A associação de métodos de mapeamento da vulnerabilidade e da avaliação de risco revelou-se uma estratégia bastante consistente para a aplicação em áreas

industriais do nosso Estado. No caso específico da ADRS foi possível comprovar que mesmo o aquífero livre apresentando uma alta vulnerabilidade à contaminação, os riscos deste vir a ser contaminado são baixos. Ressalta-se, no entanto, que essa situação só foi possível graças à política ambiental da ALBRAS, adotando técnicas adequadas de disposição de resíduos. Nos casos em que a vulnerabilidade à contaminação seja alta e as indústrias praticarem a disposição de seus resíduos sem levar em consideração essa fragilidade do meio físico a situação poderá ser drasticamente diferente.

Os estudos realizados desta dissertação revelam uma grande homogeneidade na geologia de subsuperfície da área investigada, principalmente no que concerne aos Sedimentos Pós-Barreiras que constituem o aquífero livre investigado. Logo, para a implantação de novos valos de disposição de resíduos sólidos recomenda-se que sejam utilizadas as zonas da ADRS onde o nível estático encontra-se a maiores profundidades, devido à topografia mais elevada. Fato este que dificultaria o contato entre o material depositado e o lençol freático.

Finalmente, recomenda-se que o estudo da vulnerabilidade do aquífero livre seja estendido para as instalações da ALBRAS distante cerca de 3 km da ADRS, uma vez que lá existem galpões de disposição de resíduos onde encontram-se estocados rejeitos que contêm cianeto. Essa seria uma importante estratégia preventiva para a empresa, evitando danos futuros ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMS, B. & FOSTER, S.S.D. 1992. *Land-surface zoning for groundwater protection*. J.IWEN 6(3): 312-320.
- ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H. AND PETTY; R.J., 1987. *Drastic: a standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeological settings*. U.S.EPA Report 600/2-85/018.
- ARAÚJO, P.P. 2001. *Variações sazonais dos componentes nitrogenados em aquífero livre na zona urbana de Santa Isabel do Pará, Nordeste do Estado do Pará*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 120p. (Tese de Mestrado).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA (ABGE). 1996. *Ensaio de permeabilidade em solos*. Boletim 04. 226p.
- BRASIL. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL – Projeto RADAM. 1974. Folha SA - 22 Belém- Pa; geologia, geomorfologia, solos, vegetais e uso potencial, Rio de Janeiro. p. Irreg.
- COSTA, J.B.S.; BEMERGUY, R.L.; HASUY, Y.; BORGES, M.S.; FERREIRA JUNIOR, C.R.P.; BEZERRA, P.E.L.; COSTA, M.L.; FERNANDES, J.M.G. 1996. Neotectônica da região amazônica: Aspectos tectônicos, geomorfológicos e deposicionais. *Geonomos Revista de Geociências*. Belo Horizonte. 1996. v 4. UFMG.
- DRISCOLL, F.G. 1987. *Groundwater and wells*. 2ed., Johnson Division, St. Paul Minnesota, 1088p.
- DUARTE, U. 1980. *Geologia ambiental da área de São Pedro (Sp). Vetor águas subterrâneas*. Unversidade de São Paulo. Instituto de Geociências (Tese de Doutorado).

- FARIAS, E. dos S.; NASCIMENTO, F.S. & FERREIRA, M.A.A. 1992. *Estágio de Campo III*, área Belém/Outeiro. Universidade Federal do Pará. Centros de Geociências. Departamento de Geologia, 247p. (Relatório Final).
- FERNANDES, J.M.G. 1984. Paleoecologia da Formação Pirabas no Estado do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 33, Rio de Janeiro, 1984. *Anais...* Rio de Janeiro, SBG. v.1, p.330-340.
- FERNÁNDEZ, A.E. & ARENSBURG, I.V. 1994. Grados de vulnerabilidad del sistema acuífero del gran Buenos Aires. Criterios para su determinación. In: CONGRESSO LATINOAMERICANO DE HIDROLOGIA SUBTERRÂNEA, 2, Santiago do Chile, 1994. *Anais...* Santiago do Chile, p. 17-30.
- FERREIRA, L.M.R.; DANTAS, M.G.F.; ODA, G.H.; IRITANI, M.A. & CASARINI, C.P.C. 2000. Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas na região metropolitana de Campinas – SP. In: JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1, Fortaleza, 2000. *Anais...* Fortaleza, CD-ROM Windows 95/98.
- FETTER, C.W. 1988. *Applied Hydrogeology*. 2ed. Macmillan Publishing Company. New York. 592p.
- FOLK, R. L. 1976. *Petrology of Sedimentary Rocks*. Austin: Texas – Hemphill Publishing Company, 182 p.
- FOSTER, S.S.D. 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability pollution risk and protection strategy. In: CONFERENCE OF VULNERABILITY OF SOIL AND GROUNDWATER TO POLLUTANTS. Proc. Noordwijk, The Netherlands.
- FOSTER, S.S.D. 1993. *Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas: um método baseado em dados existentes*. São Paulo, Instituto Geológico. v. 10, 92 p. (Boletim).

- FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R.C.A. 1988. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. Lima, CEPIS-PAHO/WHO. 78p.
- FOSTER, S. S. D. ; HIRATA, R. C. A. ; ROCHA, G. A. 1988. Risco de Poluição das Águas Subterrâneas: Uma Proposta Metodológica de Avaliação Regional. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 6, São Paulo, 1988. *Anais...* São Paulo, ABAS, p. 175-85.
- FOSTER, S.S.D. & HIRATA, R.C.A. 1993. *Determinação do Risco de Contaminação das Águas Subterrâneas: Um Método Baseado em Dados Existentes*. São Paulo, Instituto Geológico, v. 10, p. il., tabs. 23cm. (Boletim).
- GASPAR, M.T.P. 2001. *Avaliação dos impactos da ocupação urbana sobre as águas da bacia hidrográfica do igarapé Mata Fome, Belém-PA*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 116p. (Tese de Mestrado).
- GÓES, A.M. & TRUCKENBRODT, W. 1980. Caracterização Faciológica e interpretação ambiental dos sedimentos Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 31. Camboriú. *Anais...* SBG, v. 2, p. 766-771.
- GÓES, A.M.; ROSSETI, D.F.; NOGUEIRA, A.C.R. & TOLEDO, P.M. 1990. Modelo Depositional Preliminar para a Formação Pirabas – NE do Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*. 2: 3-15.
- HASSUDA, S. 1997. *Critérios para a gestão de áreas suspeitas ou contaminadas por resíduos sólidos – Estudo de caso na região metropolitana de São Paulo*. São Paulo, Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 142p. (Tese de Doutorado).

- HIRATA, R.C.A. 1993. Os recursos hídricos subterrâneos e as novas exigências ambientais. *Revisão do Instituto Geológico*. 82p.
- HIRATA, R.C.A. 1994. *Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas. Estudo de casos no Estado de São Paulo*. São Paulo. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. 195p. (Tese de Doutorado).
- HIRATA, R.C.A.; BASTOS, C.R.A. & ROCHA, G.A. 1997. *Mapa da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo*, Instituto Geológico/CETESB/DAEE/Secretaria do Estado de Meio Ambiente. Título 6, Série 8.
- IDESP - Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará. 1991. *Relatório estatístico do Município de Barcarena*, CEE, Setor de Coleta de Dados. 11p.
- IG/CETESB/DAEE. 1997. *Mapeamento da vulnerabilidade e risco de poluição das águas subterrâneas no Estado de São Paulo*. IG/CETESB/DAEE. v.1, 144 p.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. 1992. *Normais Climatológicas (1961-1990)*. 84p.
- IPT - Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo. 1984. *Estudo Hidrogeológico para a Definição da Possibilidade de Captação de Água Subterrânea na Usina de Alumínio da ALBRAS em Barcarena-Pa*. Relatório Nº 21, 381p.
- KOLESNIKOVAS, C. 1998. *Análise Comparativa Entre Métodos Determinísticos e Amostragens Reais no Cálculo da Análise de Risco para Inalação de Compostos Orgânicos Voláteis a Partir de Emissões do Solo*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10. São Paulo. Anais...ABAS. CD-ROM Windows 95/98.

- LEITE, C. E.S. & MÖBUS, G. 1998. *Vulnerabilidade natural a contaminação dos aquíferos da região de rochas sedimentares da bacia do rio Mundaú/Ceará*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 10. São Paulo. Anais... ABAS. CD-ROM Windows 95/98.
- LIMA, W.N. & KOBAYASHI, C.N. 1986. Sobre o Quimismo predominante nas águas do sistema flúvio-estuarino de Barcarena-Pa. *Geochimica Brasiliensis*, 1: 53-71.
- LOBO-FERREIRA, J.P. & CABRAL, M. 1991. *Proposal for an operational definition of vulnerability for the European Community's Atlas of Groundwater Resources*. In: MEETING OF THE EUROPEAN INSTITUTE FOR WATER. Groundwater Work Group. Bruxelas. Fev. 1991.
- LOBO-FERREIRA, J.P.; NOVO, M.E. & OLIVEIRA, M.M. 1999. *Groundwater vulnerability mapping: application to the Minho watershed in Northern Portugal's Celtic Region*. Disponível em: <http://www.google.com> procurar por: Minho watershed. Acesso em 25 fev. de 2002.
- MAURY, C.J. 1925. Fósseis Terciários do Brasil com Descrições de Novas Formas Cretáceas. *Serviço Geológico e Mineralógico*, Rio de Janeiro, 4: 1-705.
- MAXIMIANO, A.M.S.; CUNHA, R.C.A. & HASSUDA, S. 2000. *Uma proposta de Risk Based Screening Level (RBSL) para a região metropolitana de São Paulo utilizando o procedimento Risk Based Corrective Action (RBCA) – ASTM*. JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1. Fortaleza. Anais ... ABAS, CD-ROM Windows 95/98.

- NASCIMENTO, C.C. 1995. *Clima e morfologia urbana em Belém*. Universidade Federal do Pará. Núcleo de Meio Ambiente. 160p. (Curso de Especialização).
- PINTO, L.F. 1997. *Amazônia: O século perdido (A batalha do alumínio e outras derrotas da globalização)*. GRAFISA – Belém – Pará. 160p.
- REBOUÇAS, A.C.; BRAGA, B. & TUNDISI, J.G. (Coord). 1999. *Águas doces do Brasil – Capital Ecológica, Uso e Conservação*. Escrituras Editora. São Paulo, 688p.
- ROCCA, A. C. C.; IACOVONE, A. M. M. B.; BARROTI, A. J.; CASARINI, D. C. P.; GLOEDEN, E.; STRAUS, E. L.; ROMANO, J. A.; RUIZ, L. R.; SILVA, L. M.; SAITO, L. M.; PIRES, M. C.; LEÃO, M. L. G.; NETO, P. P. C.; COLLUCCI, R.; CUNHA. RO. C. A. 1994. *Resíduos Sólidos Industriais*. 2ª Edição EDUSP. 234p.
- RODRIGUES, S.F. 1999. *Avaliação dos riscos de contaminação do aquífero livre na área de lançamento de rejeitos sólidos na fábrica da ALBRAS, Barcarena-Pa*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 52p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- ROSSETI, D.F. 1988. *Estudo Paleoambiental e Estratigráfico na Região Bragantina, Estado do Pará*. Belém, CNPq. Museu Paraense Emílio Goeldi. 87p. (Trabalho de Aperfeiçoamento Científico).
- ROSSETI, D.F.; TRUCKEMBRODT, W. & GÓES, 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: 25-74.
- ROSSETI, D.F.; GÓES, A.M & TRUCKEMBRODT, W. 1990. A influência marinha nos sedimentos Barreiras. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi, Série Ciências da Terra*. 2: 17-29.

- SOARES, J.A. 1998. *Avaliação preliminar da vulnerabilidade do aquífero livre na área do Distrito Industrial de Barcarena*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 76p. (Trabalho de Conclusão de Curso).
- STIGTER, T. Y. & DILL, A. M. M. C. 2000. *Limitações do modelo DRASTIC - Aplicação a duas regiões algarvias contaminadas por nitratos*. JOINT WORLD CONGRESS ON GROUNDWATER, 1. Fortaleza. Anais ... ABAS. CD-ROM Windows 95/98.
- TALTASSE, P. 1972. *Mapas de vulnerabilidade à poluição dos lençóis aquíferos do município de Campinas (SP)*. Universidade de São Paulo. Instituto de Geociências. (Publicação avulsa nº 1).
- TANCREDI, A.C.F.N.S. 1996. *Recursos Hídricos Subterrâneos de Santarém – Fundamentos para Uso e Proteção*. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. 153p. (Tese de Doutorado).
- TRUCKENBRODT, W. 1981. Contribuição a Mineralogia e a Geoquímica da Formação Pirabas (Mioceno Inferior)- Estado do Pará. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*. Nº 25 (Geologia) 26p.
- VASCONCELOS, S. M. S. 1994. Estimativa de recarga subterrânea a partir do balanço hídrico – Exemplo de Fortaleza (CE). *Revista de Geologia*. 7: 27- 34.
- VRBA, J. & ZOPOROZEC, A. 1994. *Guidebook on mapping groundwater vulnerability*. International Association of Hydrogeologists. v. 16. 131p.

ANEXO

ANEXO A

FICHA CADASTRAL DE ÁREAS CONTAMINADAS

1. Identificação da Área

- 1.1- Número de cadastro: 001
- 1.2- Data da inspeção: Março a Novembro de 2000.
- 1.3- Inspetores: Homero Reis de Melo Junior e Eliene Lopes de Souza
- 1.4- Denominação atual do local: Área de Disposição de Resíduos Sólidos (ADRS).
- 1.5- Endereço: Distrito Industrial de Barcarena, Rodovia PA-483 S/N.
Município: Barcarena
- 1.6- Proprietário Atual: Alumínio Brasileiro S.A. (ALBRAS)
- 1.7- Latitude: [...] Longitude [...]
- 1.8- Tipo de Fonte de Contaminação: [1]
- (1) Disposição de Resíduos
- (2) Área Industrial
- (3) Área Comercial
- (4) Posto de Serviço
- (5) Outras Fontes
- (6) Não Conhecida
- 1.9- Situação atual quanto ao funcionamento:
- [x] Ativa(o) Desde: 1988
- [] Desativada funcionamento de _____ até _____.
- 1.10- Denominação anterior da área: Valo de Tratamento de Dejeitos (VTD)
- 1.11- Área total da propriedade ou área afetada: 5.000m².
- 1.12- Classificação da área
- | | |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Classificação: (1) Área Potencial | Motivo: (1) Identificação de AP |
| (2) Área Suspeita | (2) Avaliação Preliminar |
| (3) Área Contaminada | (3) Investigação Confirmatória |
| (4) Área Excluída | (4) Remediação |

2. Disposição de Resíduos

2.1 Tipo de Disposição [3]

- (1) Aterro Controlado
- (2) Aterro Sanitário
- (3) Aterro Industrial
- (4) Aterro de Entulhos
- (5) Lixão
- (6) Bota fora

2.2 Volume estimado de resíduos: 72.287 m³

2.3 Tipos de Resíduos

- | | |
|---|--|
| ☒ Resíduo Industrial | ☐ Resíduo de Serviço de Saúde |
| ☐ Resíduo Domiciliar | ☐ Resíduo Inerte |
| ☐ Resíduo de Mineração | ☐ Varrição |
| ☐ Entulhos | ☐ Lodos de Dragagem |
| ☐ Lodos de tratamentos de
águas residuárias | ☐ Outros lodos |

2.4 Tipos de Resíduos Industriais

Compostos inorgânicos mais tóxicos: Fluorados

2.5 Disposição Desenvolvida [1]

- (1) Acima da superfície do terreno
- (2) Abaixo da superfície do terreno
- (3) Acima e abaixo da superfície do terreno

Altura: Acima 5 m

2.6 Existência de impermeabilização inferior

- | | |
|---|---|
| ☐ Inexistente | ☐ Membrana |
| ☒ Membrana e Argila | ☐ Dupla Membrana |
| ☐ Argila | ☐ Desconhecida |

2.7 Recobrimento Operacional [1]

- (1) Sim
- (2) Não
- (3) Desconhecido

2.8 Operação de Compactação [2]

(1) Sim (2) Não (3) Desconhecido

2.9 Existência de Drenagens

(1) Sim (2) Não (3) Desconhecido

[1] de águas de escoamento superficial [2] de nascentes

[2] de líquidos percolados [2] de gases

2.10 Destino dos líquidos percolados

[] Água superficial

[] Infiltração no solo

[] Infiltração em poços

[] Estação de tratamento de esgotos

[] Estação de tratamento própria

[x] Inexistência de líquidos percolados¹

2.11 Tipo de sistema de tratamento de líquidos percolados

[x] Inexistente [] Recirculação

[] Lagoas com impermeabilização [] Digestor Anaeróbio

[] Filtros

[] Outros _____

2.12 Existência de catadores no local [3]

(1) Não

(2) Menos de 5

(3) De 5 a 50

(4) Mais de 50

2.13 Operação de impermeabilização superior [4]

(1) Inexistente

(2) Parcial

(3) Total com fraturas

(4) total

2.14 Material de impermeabilização superior [6]

(1) Inexistente

¹ Esta alternativa não consta na ficha cadastral original.

- (2) Aterro argiloso
- (3) Aterro arenoso
- (4) Membrana
- (5) Dupla membrana
- (6) Argila e membrana
- (7) Pavimentação com asfalto/cimento
- (8) Desconhecido

3. Descrição da Área e suas Adjacências (Raio de 1000 metros)

3.1 Resíduos e/ou substâncias presentes na área

Confirmado	Estimado	
☐	☐	Solventes orgânicos não halogenados
☐	☐	Solventes orgânicos halogenados
☐	☐	Hidrocarbonetos clorados voláteis
☐	☐	Hidrocarbonetos clorados não voláteis
☐	☐	Dioxinas e furanos
☐	☐	Compostos orgânicos nitrogenados, fosfatados e sulfurados (não pesticidas)
☐	☐	Hidrocarbonetos aromáticos
☐	☐	Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos
☐	☐	Fenóis
☐	☐	Derivados do petróleo
☐	☐	Alcatrão e similares
☐	☐	Pesticidas
☐	☐	Ácidos, bases e anidridos
☐	☐	Metais, ligas e compostos metálicos
☒	☐	Compostos inorgânicos de alta toxicidade (cianetos, fluoretos, sulfetos)
☐	☐	Substâncias utilizadas na indústria bélica
☐	☐	Outros
☐	☐	Desconhecido

3.2 Ocupação do solo/áreas com bens a proteger

Dentro	Fora	
☐	☐	Zona ferroviária
☐	☐	Zona viária
☐	☐	Estacionamento
☐	☐	Aeroporto
☐	☐	Área militar
☐	☐	Área comercial
☒	☐	Área industrial
☐	☐	Área de interesse público
☐	☐	Mineração
☐	☐	Residencial c/ hortas, alta densidade populacional ($\geq$ 20 casas)
☐	☐	Residencial c/ hortas, baixa densidade populacional ($<$ 20 casas)
☐	☐	Residencial s/ hortas, alta densidade populacional ($\geq$ 20 casas)
☐	☒	Residencial s/ hortas, baixa densidade populacional ($<$ 20 casas)
☐	☐	Parque, área verde
☐	☐	Parque infantil/Jardim infantil
☐	☐	Área de lazer e desportos
☐	☐	Cemitério
☐	☐	Escola
☐	☐	Hortas
☐	☐	Área de pecuária
☐	☐	Área agrícola
☒	☒	Mata natural
☐	☒	Área de proteção Ambiental
☐	☐	Área de proteção de mananciais

- | | | |
|--------------------------|-------------------------------------|---|
| ☐ | ☐ | Bacia hidrográfica para abastecimento |
| ☐ | ☐ | Aqüíferos importantes |
| ☐ | ☐ | Zona de maior restrição de proteção de mananciais |
| ☐ | ☐ | Área inundável, várzea |
| ☐ | ☐ | Represa para abastecimento público |
| ☐ | ☐ | Água superficial para abastecimento público |
| ☐ | ☐ | Poço para abastecimento público |
| ☐ | ☒ | Poço para abastecimento domiciliar |

3.3 Uso atual da área

- ☐ Edificação industrial desativada
- ☐ Edificação industrial com uso residencial
- ☐ Edificação industrial com uso comercial
- ☐ Edificação industrial com uso cultural
- ☐ Edificação industrial com uso industrial
- ☐ Edificação comercial
- ☐ Edificação residencial
- ☐ Edificação cultural
- ☐ Edificação industrial
- ☒ Sem edificações
- ☒ Outros _____

3.4 Uso previsto para a área

- ☐ Residencial
- ☒ Industrial
- ☐ Comercial
- ☐ Cultural
- ☐ Desconhecido
- ☐ Outros _____

3.5 Distância até a edificação mais próxima da área [3]

- (1) < 50 m (2) 50 – 100 m (3) 100 – 500 m (4) > 500 m (5) Inexistente

3.6 Posição da área no relevo

- ☒ Várzea ☐ Fundo de vale
☐ Encosta ☐ Topo
☐ Cava de mineração
☐ Outros Tesos
-

3.7 Textura predominante do solo [2]

- (1) argilosa (2) arenosa (3) siltosa

3.8 Resultado da análise do solo [3]

- (1) Contaminado
(2) Não contaminado
(3) Análise não realizada
(4) Desconhecida

3.9 Variação do nível da água subterrânea na área ☐ inferida ☒ medida
De 0 a 8 metros

3.10 Nível sazonalmente mais elevado da água subterrânea [2]

- (1) Em contato com o resíduo/solo contaminado
(2) Abaixo do resíduo/solo contaminado
(3) Desconhecida

3.11 Existência de água subterrânea contaminada por influência da área (confirmada por análise ou presença de produto/substância imiscível)

- ☐ Sim ☒ Não ☐ Desconhecida

3.12 Uso da água subterrânea afetada pela contaminação

- | | |
|--|---|
| ☐ Abastecimento público | ☐ Abastecimento domiciliar |
| ☐ Irrigação/pecuária/psicultura | ☐ Recreação |
| ☐ Industrial | ☐ Desconhecida |
| ☒ Inexistente | |

3.13 Contexto hidrogeológico da área [1 – 2]

- (1) Quaternário
(2) Terciário em área de recarga
(3) Terciário em área de descarga
(4) Cárstico

(5) Cristalino aflorante

(6) Desconhecido

3.14 Existência de água superficial contaminada por influência da área (confirmada por análise ou presença de produto/substância imiscível)

☐ Não

☐ Sim, utilizada para abastecimento público

☐ Sim, utilizada para abastecimento domiciliar

☐ Sim, não utilizada

☐ Sim, utilizada para irrigação/pecuária/psicultura

☐ Sim, utilizada para recreação

☒ Desconhecida

3.15 Possibilidade de influência direta da área sobre as águas superficiais

☐ Não

☐ Sim, utilizada para abastecimento público

☐ Sim, utilizada para abastecimento domiciliar

☐ Sim, não utilizada

☐ Sim, utilizada para irrigação/pecuária/psicultura

☐ Sim, utilizada para recreação

☒ Desconhecida

3.16 Possibilidade de enchente na área e uso da água superficial no local

☒ Não

☐ Sim, utilizada para abastecimento público

☐ Sim, utilizada para abastecimento domiciliar

☐ Sim, não utilizada

☐ Sim, utilizada para irrigação/pecuária/psicultura

☐ Sim, utilizada para recreação

☐ Desconhecida

3.17 Qualidade do ar do solo na área [3]

(1) Contaminada

(3) Análise não realizada

(2) Não contaminada

(4) Desconhecida

4. Eventos importantes / Riscos comprovados

4.1 Ocorrência de acidentes e/ou eventos importantes

- ☐ Recalque
- ☐ Desabamento
- ☐ Erosão
- ☒ Danos á vegetação
- ☒ Dispersão de poeira contendo contaminante do local
- ☐ Danos aos animais
- ☐ Danos á saúde
- ☐ Danos materiais
- ☐ Explosão
- ☐ Incêndio
- ☐ Emissão perceptível de gases/vapores
- ☐ Outros
- ☐ Desconhecida
- ☐ Inexistente

4.2 Erosão existente [1]

- (1) Inexistente
- (2) Laminar
- (3) Sulco
- (4) Ravina
- (5) Voçoroca

4.3 Existência de risco comprovado a respeito de contaminação do solo

- ☐ Não, assegurado por análises
- ☐ Sim, para a saúde da população
- ☐ Sim, para animais
- ☐ Sim, para a vegetação
- ☒ Desconhecida

3.4 Indicações visíveis na superfície do solo

- ☐ Presença de contaminante

☐ Odor

☐ Coloração

☐ Inexistente

☒ Desconhecida

☐ Outros _____

4.5 Presença de gases/vapores nas edificações vizinhas [2]

(1) Sim

(2) Não

(3) Desconhecida

5. Fontes de Informação

☐ SECTAM

☐ Prefeitura

☐ População local

☐ Indústrias locais

☒ ALBRAS

☐ Outros